Vol. 14, No. 2, 2022, pp. 115–141 ISSN (Print): 2008-7306 ISSN (Online): 2423-5865

Journal of Economic Geology

https://econg.um.ac.ir

RESEARCH ARTICLE 10.22067/ECONG.2021.68737.1008 OPEN ACCESS

Mineralogy of anorthosite veins and host gabbros in the Kal-e-Kafi intrusive body (northeast of Anarak, Isfahan Province, Central Iran)

Hanan Salim [1], Ghodrat Torabi [2 *], Nargess Nosouhian [3]

[1] Ph.D. Student, Department of Geology, University of Isfahan, Isfahan, Iran
[2] Professor, Department of Geology, University of Isfahan, Isfahan, Iran
[3] Ph.D., Department of Geology, University of Isfahan, Isfahan, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 06 February 2021
Revised: 10 November 2021
Accepted: 16 November 2021

Keywords

Plagioclase
Clinopyroxene
Anorthosite
Gabbro
Eocene
Kal-e-Kafi
Central Iran

***Corresponding author**

Ghodrat Torabi
✉ Torabighodrat@sci.ui.ac.ir

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

In the northeastern part of the Isfahan province and 65 km northeast of the Anarak city (Kal-e-Kafi area), an I-type granitoid pluton cross cut the Paleozoic metamorphic rocks and Eocene volcanic rocks. In the contact of this granitoid body with sourrounding rock units, skarn and hornfels have been formed (Ahmadian, 2012; Ranjbar, 2010). The Kal-e-Kafi Eocene intrusive body presents a wide range of mineralogical and petrological compositions, from gabbro to alkali-feldspar granite. Presence of mafic to acidic rocks in this mostly-granitoid body indicates that fractional crystallisation has played an important role during magma evolution. The field and petrographical studies indicate the presence of anorthosite veins within the gabbro section. The mafic and basic parts of this pluton have not been studied yet. The mineralogy and chemistry of rock-forming minerals in the anorthosites and gabbros are the subject of this research study.

Analytical Methods

The mineralogical and petrographical studies have been done by using Olympus BH-2 polarizing microscope in the mineralogy laboratory of the University of Isfahan. EPMA and LA-ICP-MS analyses were used to obtain chemical characteristics of rock-forming minerals. Major-elements composition of minerals were performed by JEOL JXA-8800, WDS microprobe electron analyzer with accelerator voltage of 15 kV, current of 15 nmA, diameter of 3 µm, and a counting time of 40 seconds at the Kanazawa University of Japan.

How to cite this article

Salim, H., Torabi, Gh. and Nosouhian, N., 2022. Mineralogy of anorthosite veins and host gabbros in the Kal-e-Kafi intrusive body (northeast of Anarak, Isfahan Province, Central Iran). Journal of Economic Geology, 14(2): 115–141. (in Persian with English abstract)
https://dx.doi.org/10.22067/ECONG.2021.68737.1008

Natural and synthetic minerals and compounds were used as standards. The ZAF program was used for data correction.

Trace element values of plagioclases and clinopyroxenes were analyzed by LA-ICP-MS (laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry) using an ArF 193 nm Excimer Laser coupled to an Agilent 7500S at the Earth Science Department of the Kanazawa University, Japan. The diameter of the analyzed points was 110 µm at 10 Hz with energy density of 8 J/cm2 per pulse.

Mineral abbreviations in tables and photomicrographs are adopted from Whitney and Evans (2010).

Results and Discussion

The Eocene Kal-e-Kafi pluton includes a wide range of rocks from gabbro to alkali-feldspar granite, which points to an extensive magmatic differntiation. Field relationships indicate presence of at least 4 magmatic phases, and gabbro is the first and oldest phase. The most predominant rock unit in the Kal-e-Kafi intrusive body is granitoid. However, in the northern parts, the gabbro and anorthosite present substantial exposures. The anorthosites and gabbros are associated with each other in the field. Anorthositic veins with up to 15 cm thickness cut the gabbro.

Gabbro is composed of bytownite and anorthite plagioclase (An= 84 – 94 %; some of them have been altered to bytownite, andesine and oligoclase), clinopyroxene (diopside, Mg#= 0.75), orthoclase ($Or_{0.88}$), apatite, magnetite, and prehnite. Anorthosite rock-forming minerals are anorthite plagioclase (An= 89 – 95 %; some anorthite plagioclase have been altered to bytownite and labradorite), sphene and zircon. The main texture of these rocks are granular, intergranular and poikilitic. Field studies suggest that anorthosites are associated with gabbros which have filled the fractures of gabbros.

Very simmilar petrography and chemical composition of plagioclases in the anorthosites and gabbros possibly reveal their cogenetic nature. It seems that the primary magma in the magma chamber, first crystallized the clinopyroxene and plagioclase, which caused formation of gabbros. In the next stage, by occurrence of a tectonic activity, the gabbros have broken and the remaining magma which was rich in plagioclase components, crystallized the anorthosites in the fractures. This reveals that the anorthosites of the study area are the plagioclase rich part of the primary basic magma which have formed the gabbros.

According to the field relationships, it is generally believed that anorthosites are differentiates of gabbroic magmas. The studied anorthosite veins and gabbros of the Kal-e-Kafi area are consanguineous. These anorthosites are perhaps generated by the process of collection of plagioclase crystals from a gabbroic magma under the action of gravity and tectonic activity (filter pressing).

Pyroxene is one of the common minerals. The chemical composition of this mineral provides valuable information about the nature of magma, H2O content, Oxygen fugacity, type of magmatic series, tectonic setting, as well as temperature and pressure of crystallisation (Schweitzer et al., 1979; Leterrier et al., 1982; D'Antonio and Kristensen, 2005).

Chemistry of clinopyroxens within the gabbros of the Kal-e-Kafi area shows that the parental magma belongs to the sub-alkaline and calc-alkaline magmatic series and these rocks are similar to those of volcanic arcs. The time and place of formation of these plutonic rocks possibly indicate that they are formed by subduction of the Central-East Iranian Microcontinent (CEIM) – confining oceanic crust beneath the CEIM.

Acknowledgments

The authors thank the University of Isfahan for financial supports.

دوره ۱۴، شماره ۲، ۱۴۰۱، صفحه ۱۱۵ تا ۱۴۱ شاپا چاپی: ۷۳۰۶-۲۰۰۸ شاپا الکترونیکی: ۵۸۶۵-۲۴۲۳

زمین‌شناسی اقتصادی
https://econg.um.ac.ir

مقاله پژوهشی 10.22067/ECONG.2021.68737.1008 OPEN ACCESS

کانی‌شناسی رگه‌های آنورتوزیتی و گابروهای دربرگیرنده در توده نفوذی کالکافی (شمال‌شرق انارک، استان اصفهان، ایران مرکزی)

حنان سلیم [۱]، قدرت ترابی [۲] *، نرگس نصوحیان [۳]

[۱] دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
[۲] استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
[۳] دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۸/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۲۵

واژه‌های کلیدی

پلاژیوکلاز
کلینوپیروکسن
آنورتوزیت
گابرو
ائوسن
کالکافی
ایران مرکزی

نویسنده مسئول

قدرت ترابی
Torabighodrat@sci.ui.ac.ir

چکیده

منطقه کالکافی در حدود ۶۵ کیلومتری شمال‌شرق شهر انارک (بخش شمال‌شرقی استان اصفهان) واقع‌شده است. در این منطقه توده نفوذی کالکافی با سن ائوسن بالایی، دگرگونه‌های پالئوزوئیک انارک، سنگ آهک‌های کرتاسه و سنگ‌های آتشفشانی ائوسن زیرین و میانی را قطع کرده است. این توده نفوذی طیف گسترده‌ای از سنگ‌ها از گابرو تا آلکالی فلدسپار گرانیت را شامل می‌شود که بیانگر رخداد تفریق ماگمایی بسیار گسترده است. آنورتوزیت‌ها به صورت رگه‌هایی در درون گابروها دیده می‌شوند که ضخامت این رگه‌ها متغیر بوده و تا حدود ۱۵ سانتی‌متر هم می‌رسد. گابروها از پلاژیوکلازهای نوع آنورتیت (An= ٪۹۴-۸۴) که برخی از آنها به بیتونیت، آندزین و الیگوکلاز تغییر یافته‌اند، کلینوپیروکسن از نوع دیوپسید (Mg#=۰/۷۵)، ارتوکلاز ($Or_{0.88}$)، آپاتیت، مگنتیت و پرهنیت تشکیل‌شده است. آنورتوزیت‌ها نیز متشکل از کانی‌های پلاژیوکلاز از نوع آنورتیت (٪۹۵-۸۹ =An؛ که گاهی این پلاژیوکلازها به بیتونیت و لابرادوریت تغییر یافته‌اند)، اسفن و زیرکن هستند. بافت‌های اصلی این سنگ‌ها گرانولار، اینترگرانولار و پوئی‌کیلیتیک است. بررسی‌های صحرایی نشان می‌دهد که آنورتوزیت‌ها با گابروها همراه بوده و شکستگی‌های گابروها را پر کرده‌اند. بررسی ترکیب شیمیایی پلاژیوکلازهای درون گابروها و پلاژیوکلازهای موجود در آنورتوزیت‌ها بیانگر شباهت بسیار زیاد این کانی‌ها از نظر محتوای عناصر اصلی و کمیاب بوده و بیانگر ارتباط ژنتیکی این سنگ‌هاست. این ویژگی نشان می‌دهد که آنورتوزیت‌های منطقه کالکافی در حقیقت ادامه تبلور بخش غنی از پلاژیوکلاز ماگمای گابرویی اولیه است.

استناد به این مقاله

سلیم، حنان؛ ترابی، قدرت و نصوحیان، نرگس ، ۱۴۰۱. کانی‌شناسی رگه‌های آنورتوزیتی و گابروهای دربرگیرنده در توده نفوذی کالکافی (شمال‌شرق انارک، استان اصفهان، ایران مرکزی) . زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۴(۲): ۱۱۵-۱۴۱. https://dx.doi.org/10.22067/ECONG.2021.68737.1008

مقدمه

بررسی بخش بازیک و مافیک توده‌های نفوذی که دارای ترکیب عمومی گرانیتوئیدی هستند، اطلاعات بسیار مهمی در مورد ماهیت ماگمای والد و همچنین تحولات مرتبط با آن ماگماتیسم در اختیار زمین‌شناسان قرار می‌دهد. متأسفانه در بسیاری از بررسی‌های انجام‌شده بر روی توده‌های گرانیتوئیدی، سنگ‌شناسی بخش‌های بازیک این توده‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. ماگماهای بازالتی و گابرویی معمولاً به عنوان ماگمای اولیه در نظرگرفته می‌شوند و بررسی آنها می‌تواند مسائل مرتبط با رخداد ذوب‌بخشی، تشکیل ماگما، تفریق و تحولات حین صعود ماگما را مشخص کند (Green et al., 2001).

ناحیه انارک به سبب وجود کانسارهای مختلف و واحدهای سنگی بسیار متنوع، از دیرباز مورد توجه زمین‌شناسان و معدن‌کاران بوده است (Yakovenko et al., 1981; Aistov et al., 1984; Romanko et al., 1984). منطقه کالکافی و مناطق مجاور نیز به عنوان بخشی از ناحیه انارک توسط پژوهشگران متعددی از دیدگاه‌های زمین‌شناسی ناحیه‌ای، سنگ‌شناسی و ارزیابی توانایی‌های معدنی مورد بررسی قرارگرفته است (Ahmadian et al., 2009; Namdar Mohammadi, 2009; Ahmadian et al., 2016; Sargazi and Torabi, 2019). این منطقه از نظر وجود کانی‌سازی مس، مولیبدن، طلا، آهن، دگرسانی‌های وابسته و وجود اسکارن‌ها و هورنفلس دارای اهمیت فراوان است (Ranjbar, 2010).

رخداد پلوتونیسم کالکافی در زمان ائوسن و ورود توده نفوذی به درون سنگ‌های قدیمی‌تر این منطقه، عامل کانی‌سازی‌های مختلف در منطقه معرفی‌شده است (Salim, 2019). بخش بازیک این توده نفوذی (گابرو و آنورتوزیت) تاکنون مورد بررسی سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی قرارنگرفته است. از آنجایی که بررسی ماگماها و سنگ‌های بازیک به عنوان ماگمای اولیه یا ماگمای نزدیک به اولیه در بررسی‌های پتروژنز بسیار مهم بوده (Green et al., 2001) و از آنوتوزیت‌ها نیز علاوه بر اهمیت سنگ‌شناسی می‌توان به عنوان یک کلید اکتشافی استفاده کرد (Woodruff et al., 2013; Charlier et al., 2015). این پژوهش بر روی گابرو و آنوتوزیت‌های منطقه کالکافی متمرکز شد. تعیین ماهیت و چگونگی تشکیل گابروها و آنورتوزیت‌های موجود در توده نفوذی منطقه کالکافی، به همراه تعیین سری ماگمایی و بیان تحولات سنگ‌شناختی آن‌ها از اهداف این پژوهش می‌باشد که به منظور دسترسی به آنها از نتایج بررسی‌های صحرایی، پتروگرافی و شیمی کانی‌ها استفاده شده است.

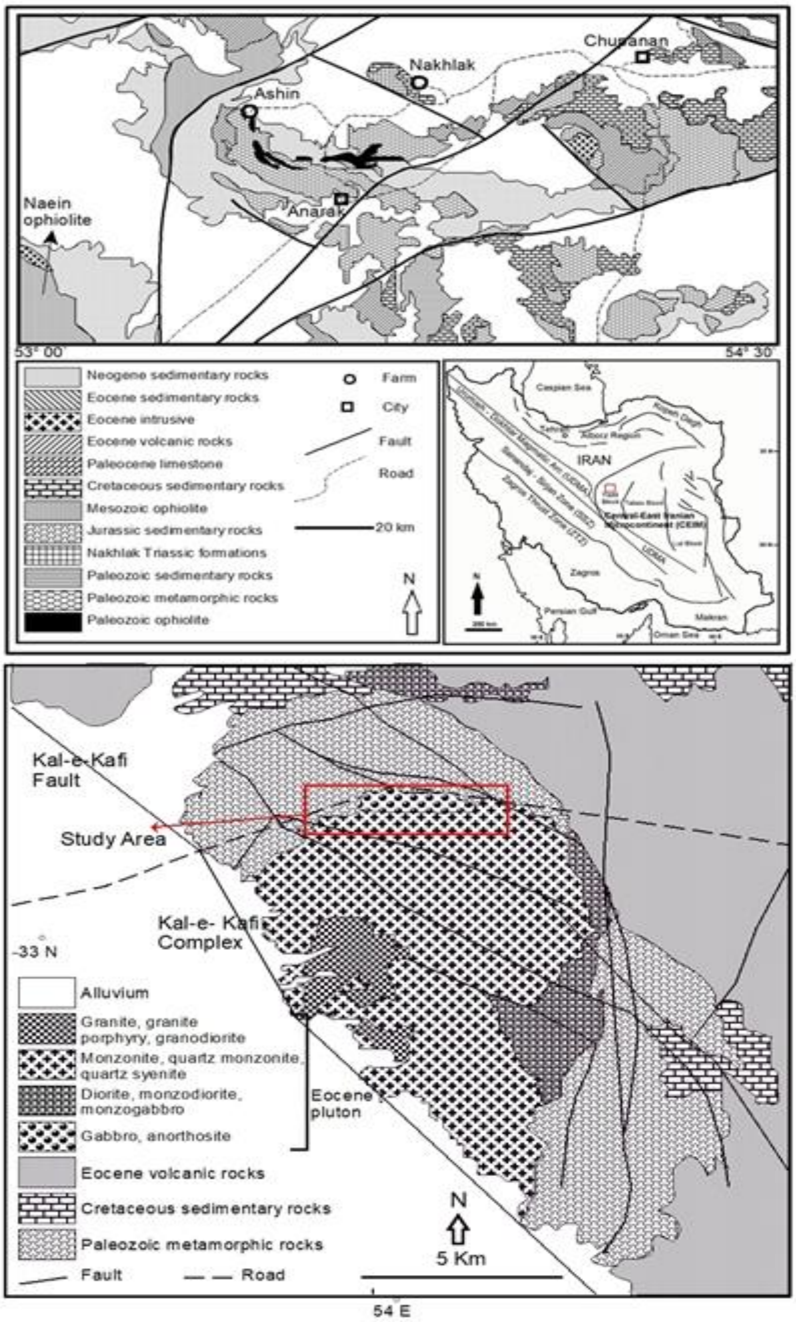
زمین‌شناسی منطقه کالکافی

در بخش‌های شمال‌شرقی استان اصفهان و ۶۵ کیلومتری شمال‌شرق شهر انارک، در منطقه کالکافی یک توده نفوذی گرانیتوئیدی از نوع I (Ahmadian, 2012; Ahmadian et al., 2016)، سنگ‌های دگرگونی پالئوزوئیک و سنگ‌های ولکانیک ائوسن را قطع‌کرده است و در مرز این توده گرانیتوئیدی با سنگ‌های اطراف اسکارن و هورنفلس تشکیل‌شده است (Ranjbar, 2010). توده نفوذی کالکافی دارای سن ائوسن بوده (Aistov et al., 1984) و محدوده وسیعی از ترکیب کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی شامل گابرو تا گرانیت را شامل می‌شود. استوک گرانیتوئیدی کالکافی از نظر عناصر مس، مولیبدن و طلا دارای اهمیت اقتصادی فراوانی بوده و بررسی‌های اکتشافی چندی روی آن انجام‌شده (Yakovenko et al., 1981) و یا در حال انجام است. بررسی‌های صحرایی نشان از وجود رگه‌های آنورتوزیتی در درون گابروهای این منطقه دارد. سنگ‌های بازیک این توده گرانیتوئیدی تاکنون بررسی نشده‌اند.

منطقه کالکافی به صورت ساختاری گنبدی شکل بزرگ است که گرانیتوئید کالکافی در مرکز آن واقع‌شده است (شکل ۱) (Salim, 2019). پریدوتیت‌ها و سنگ‌های دگرگونی پالئوزوئیک مجموعه انارک که سنگ میزبان توده نفوذی کالکافی هستند، در بخش‌های شمالی و جنوبی منطقه رخنمون دارند (شکل ۲-A) (Zakipour and Torabi, 2021). دگرگونه‌های پالئوزوئیک

DOI: 10.22067/ECONG.2021.68737.1008

انارک که موسوم به شیست‌های انارک بوده، بعد از پریدوتیت‌ها، قدیمی‌ترین سنگ‌های منطقه هستند. سنگ‌های آتشفشانی در بخش شرقی با ناپیوستگی بر روی واحدهای رسوبی کرتاسه زیرین قرار گرفته‌اند (شکل ۲-A) (Nazari et al., 2019).



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی ساده شده منطقه کالکافی برگرفته از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کبودان، آیستوف و همکاران (Aistov et al., 1984) با تغییرات)

Fig. 1. Simplified geological map of the Kal-e-Kafi area (Adapted from Kaboudan 1:100000 geological map, by Aistov et al., 1984; slightly modified)

DOI: 10.22067/ECONG.2021.68737.1008

سنگ آهک‌های کرتاسه نیز با ناپیوستگی زاویه‌دار بر روی تشکیلات پالئوزوئیک قرار دارند (شکل ۲-B). توده نفوذی کالکافی علاوه بر سنگ‌های ولکانیک ائوسن، سنگ آهک‌های کرتاسه، مرمرها و شیست‌های پالئوزوئیک را نیز قطع کرده و باعث ایجاد اسکارن و هورنفلس شده است (شکل ۱) (Salim, 2019). گرانیتوئید کالکافی توده‌ای بیضی شکل با ابعاد تقریبی ۵/۵×۸ کیلومتر است (شکل ۱). بررسی‌های انجام‌شده در این پژوهش و پژوهش‌های احمدیان و احمدیان و همکاران (Ahmadian, 2012; Ahmadian et al., 2016) بیانگر وجود حداقل ۴ فاز ماگمایی در مجموعه پلوتونیک کالکافی است که از قدیم به جدید عبارتند از:

۱) فاز اول: گابرو، آنورتوزیت و دیوریت

۲) فاز دوم: مونزونیت و سینیت

۳) فاز سوم: کوارتز مونزونیت تا کوارتز سینیت

۴) فاز چهارم: آلکالی فلدسپار گرانیت پورفیری و مونزوگرانیت پورفیری که سنگ‌های این فاز ماگمایی دارای کانی‌سازی مس-مولیبدن هستند.

تعیین سن مطلق انجام‌شده توسط آیستوف و همکاران (Aistov et al., 1984) بر روی گرانیت و کوارتز سینیت‌ها با روش K-Ar، سن ۵۳ میلیون سال معادل با ائوسن پیشین را نشان‌داده است. تعیین سن گابروها نیز عدد ۶۰ میلیون سال را تأییدکرده که بیانگر زمان پالئوسن است. تعیین سن زیرکن‌های موجود در کوارتز مونزونیت‌ها و گرانیت‌های این توده نفوذی به روش U-Pb توسط احمدیان و همکاران (Ahmadian et al., 2016) نیز سن‌های ۱ ± ۵۲ و ۱ ± ۵۰/۳ میلیون سال را ارائه می‌کند که بیانگر ائوسن پیشین است.

در اثر ورود توده نفوذی گرانیتوئیدی کالکافی به درون دگرگونه‌های انارک یک زون هورنفلسی در سنگ‌های دگرگونه میزبان ایجادشده است (Ranjbar, 2010) که در برخی موارد قطعه‌هایی از این هورنفلس‌ها به صورت آنکلاو در درون گرانیتوئیدها قابل مشاهده هستند (شکل ۲-C و G).

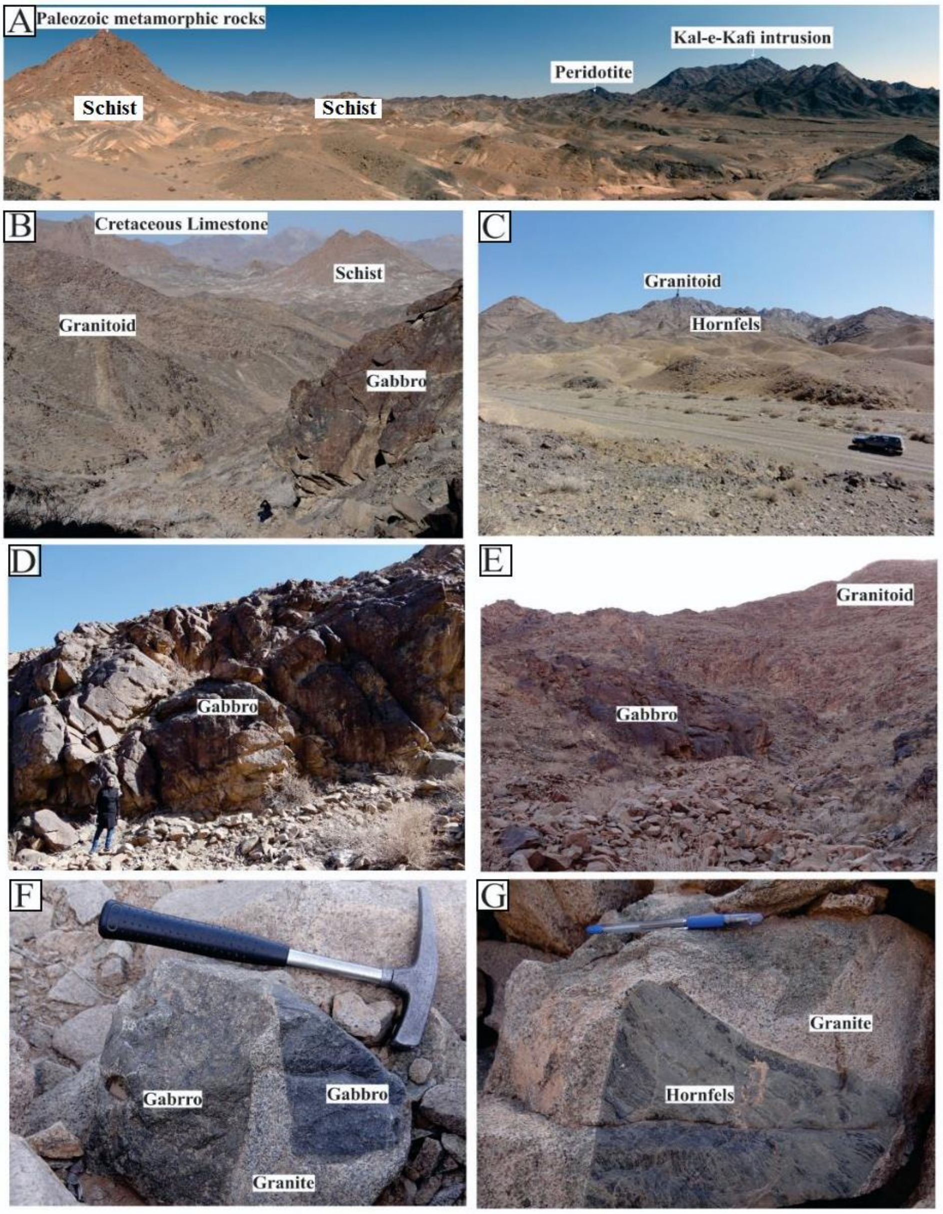
بررسی‌های صحرایی این پژوهش نشان‌داده است که در بخش‌های شمالی این توده نفوذی، یک واحد گابرویی وجود دارد که قدیمی‌ترین واحد سنگ‌شناسی بوده و در همراهی با آنورتوزیت‌هاست (شکل ۲-D و E). آنورتوزیت‌ها به صورت رگه‌هایی روشن رنگ در درون گابروها وجود دارند (شکل ۳). بنابراین پیشنهاد می‌شود که نام فاز اول ماگمایی در توده نفوذی کالکافی به صورت فاز گابرو، آنورتوزیت، دیوریت و مونزودیوریت بیان‌شود. ضخامت رگه‌های آنورتوزیتی درون گابروها متغیر بوده و به ۱۵ سانتی‌متر نیز می‌رسد. در بخش‌های شمالی این توده نفوذی، علاوه بر رخنمون‌های اصلی، گابروها را می‌توان به صورت آنکلاوهایی در درون گرانیتوئیدها نیز مشاهده کرد (شکل ۲-E و F). در این توده نفوذی، انواع گابرو شامل گابروهای پگماتوئیدی، ملاگابرو، مزوگابرو و لوکوگابرو را می‌توان مشاهده کرد. وجود انواع گابرو و مشتقات آن از ملاگابرو تا لوکوگابرو، دیوریت، کوارتز دیوریت و مونزودیوریت در فاز اول توده نفوذی کالکافی را می‌توان حاصل رخداد تفریق ماگمایی گسترده دانست.

کانی‌شناسی

روش انجام تحقیق

همزمان با بررسی های صحرایی، از واحدهای مختلف سنگی موجود در منطقه، نمونه‌برداری صورت‌گرفت. تعداد ۳۹ نمونه سالم و با دگرسانی اندک برای تهیه مقطع نازک و نازک- صیقلی انتخاب شدند. بررسی‌های پتروگرافی با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان الیمپوس مدل BH-2 در آزمایشگاه کانی‌شناسی دانشگاه اصفهان انجام‌شد و برخی از کانی‌ها برای انجام آنالیز شیمیایی انتخاب شدند. برای دستیابی به داده‌های شیمیایی کانی‌ها از دستگاه‌های آنالیز EPMA و LA-ICP-MS استفاده شد. آنالیز نقطه‌ای کانی‌ها برای تعیین مقدار عناصر اصلی، توسط دستگاه آنالیز الکترون میکروپروب JEOL JXA-8800, WDS با ولتاژ شتاب‌دهنده ۱۵ کیلوولت و جریان ۱۵ نانوآمپر و قطر ۳ میکرومتر در دانشگاه کانازاوای ژاپن انجام‌شد.

DOI: 10.22067/ECONG.2021.68737.1008



شکل ۲. تصاویر صحرایی منطقه کالکافی و واحدهای سنگی موجود در آن، A: نمای کلی از واحدهای سنگی موجود در منطقه شامل پریدوتیت، دگرگونه‌های انارک و توده نفوذی کالکافی (نگاه به سمت جنوب‌شرقی)، B: گابرو و گرانیتوئید همراه با شیست‌های پالئوزوئیک و سنگ آهک‌های کرتاسه (نگاه به سمت شمال‌غرب)، C: تشکیل هورنفلس در مرز توده نفوذی گرانیتوئیدی با شیست (نگاه به سمت شرق)، D: بخش گابرویی توده نفوذی منطقه کالکافی (نگاه به سمت شرق)، E: رخنمون گابروها به صورت انکلاو بزرگ در بخش گرانیتوئیدی، F: قطعاتی از گابروها به صورت آنکلاو در گرانیتوئید و G: قطعه‌ای زینولیت هورنفلسی در گرانیتوئید

Fig. 2. Field photographs of the Kal-e-Kafi area and rock units, A: A panorama view of the Kal- e-Kafi area presents peridotite, Anarak metamorphic rocks and Kal- e-Kafi pluton (View to the southeast), B: Gabbro and granitoid associated with Paleozoic schist and Cretaceous limestone (View to the northwest), C: Hornfels formation in contact of the granitoid and Paleozoic schists (View to the east), D: Gabbroic part of the Kal-e-Kafi pluton (View to the east), E: Gabbro exposure as a big enclave within the granitoid pluton, F: Gabbroic enclaves in the granitoid, and G: Hornfels xenolith enclave within the granitoid

DOI: 10.22067/ECONG.2021.68737.1008

تعدادی از کانی‌های پلاژیوکلاز موجود در گابروها و آنورتوزیت‌های منطقه کالکافی که بدون دگرسانی بوده و شرایط مناسب برای انجام آنالیز LA-ICP-MS را دارا بودند، برای این روش از آنالیز انتخاب شدند. این آنالیز برای دستیابی به مقادیر عناصر کمیاب و کمیاب خاکی موجود در پلاژیوکلازهای گابروها و آنورتوزیت‌های توده نفوذی کالکافی انجام‌شد. در این بررسی، دستگاه لیزر ابلیشن مدل 193 nm ArF excimer: MicroLas GeoLas Q-Plus به‌همراه طیف‌سنج جرمی ICP مدل Agilent 7500S در دانشگاه کانازاوای ژاپن استفاده شد که در این روش قطر نقطه‌های آنالیز، ۶۰ میکرومتر است.

علائم اختصاری کانی‌ها که در تصاویر میکروسکوپی آورده شده‌اند، از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس‌شده است.

پتروگرافی گابروها و آنورتوزیت‌های توده نفوذی کالکافی

بررسی نمونه دستی سنگ‌های منطقه کالکافی نشان می‌دهد که انواع مختلفی از گابرو در این منطقه وجود دارد که بعضی از آنها همراه با رگه‌هایی از آنورتوزیت هستند (شکل ۳–A و B). آنورتوزیت‌ها به صورت رگه‌هایی در گابروها با ضخامت متفاوت و بیشینه تا ۱۵ سانتی‌متر دیده می‌شوند (شکل ۳). گابروهای مورد بررسی به رنگ سبز تیره بوده و بسیار متراکم هستند و بلورهای کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز در آنها به خوبی قابل مشاهده‌اند (شکل ۳–C و D)؛ در حالی‌که رگه‌های آنورتوزیتی سفید رنگ بوده و درز و شکاف‌های موجود در گابروها را پر می‌کنند. این رگه‌ها اغلب از کانی پلاژیوکلاز تشکیل شده‌اند و بدون کانی‌های تیره هستند (شکل ۳–C و D). در بررسی‌های صحرایی و پتروگرافی به خوبی مشخص است که برخی از رگه‌های آنورتوزیتی یکدیگر را قطع می‌کنند که نشان می‌دهد در این منطقه حداقل دو فاز آنورتوزیت‌زایی رخ‌داده است (شکل ۳–D).

پتروگرافی گابروها

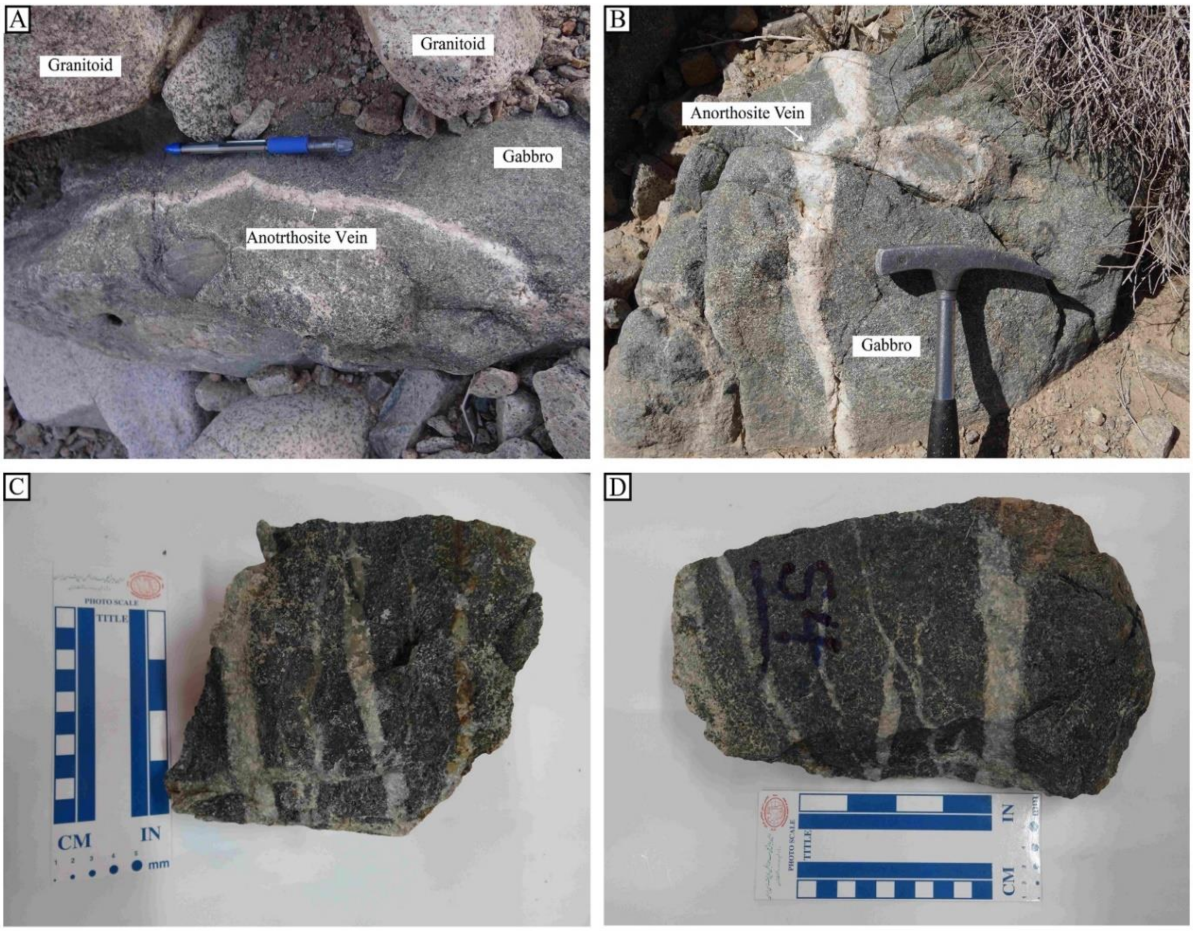
بررسی‌های پتروگرافی در این پژوهش و پژوهش‌های پیشینیان مثل احمدیان، احمدیان و همکاران (Ahmadian, 2012; Ahmadian et al., 2016) همگی بیانگر این موضوع هستند که توده نفوذی کالکافی دارای شواهد تفریق گسترده بوده و سنگ‌های بازیک تا اسیدی را شامل می‌شود. گابروها نیز در بررسی‌های پتروگرافی از تیره تا روشن دیده می‌شود. این تغییرات پتروگرافی در اثر رخداد تفریق ایجادشده است. در این تغییرات، از مقدار مودال پیروکسن کاسته شده و به مقدار پلاژیوکلاز افزوده می‌شود. از بین گابروها فقط مزوگابروها دارای رگه‌های آنوتوزیتی بودند که در این پژوهش بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. گابروها متوسط تا درشت‌بلور بوده و به رنگ سبز تیره قابل مشاهده هستند. از نظر پتروگرافی، این گابروها دارای کانی‌های اصلی کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز (۸۵ درصد) و کانی‌های فرعی شامل ارتوکلاز، آپاتیت، پرهنیت، مگنتیت، کلریت، ترمولیت، زیرکن و اسفن (۱۵ درصد) هستند (شکل ۴–A، B، C و D). بافت‌های اصلی موجود در این سنگ‌ها بافت‌های گرانولار، اینترگرانولار و پوئی کیلیتیک هستند.

کلینوپیروکسن عمده‌ترین و مهم‌ترین کانی در سنگ‌های گابرویی دربرگیرنده آنورتوزیت‌هاست که درصد بالایی از سنگ (بیش از ۵۰ درصد حجمی) را به خود اختصاص‌داده است (شکل ۴). کلینوپیروکسن‌ها به صورت بلورهای نیمه‌خودشکل بوده و ابعاد آنها از ۰/۲ تا ۴/۵ میلی‌متر متغیر است. بررسی‌های میکروسکوپی نشان‌دهنده آن است که در این گابروها، ابتدا کلینوپیروکسن شروع به تبلور کرده و سپس در حالی‌که کلینوپیروکسن هنوز در حال تبلور بوده است، پلاژیوکلاز نیز شروع به تبلور می‌کند (تبلور همزمان). پس از مدتی، تبلور کلینوپیروکسن تمام شده و پلاژیوکلاز به تبلور خود ادامه می‌دهد (شکل ۴). در برخی موارد در کناره‌ها، در طول شکستگی‌ها و در امتداد رخ‌های کلینوپیروکسن شواهدی از تأثیر دگرسانی را می‌توان با ایجاد

DOI: 10.22067/ECONG.2021.68737.1008

کلریت و آمفیبول (ترمولیت) مشاهده کرد که مقداری کانی کدر هم ایجادشده است.

پلاژیوکلاز بیش از ۳۵ درصد حجمی گابروها را به خود اختصاص‌داده است. پلاژیوکلازها به‌صورت بی‌شکل تا شکل‌دار بوده و اغلب سالم و بدون دگرسانی هستند (شکل ۴). برخی از این پلاژیوکلازهای اولیه که کلسیک هستند، به طور بخشی به پرهنیت تبدیل شده‌اند.



شکل ۳. A و B: رگه‌های آنورتوزیتی در درون گابروهای توده نفوذی کالکافی، C و D: به خوبی مشخص است که برخی رگه‌های آنورتوزیتی یکدیگر را قطع کرده‌اند.

Fig. 3. A and B: The anorthosite veins within the gabbros of the Kal-e-Kafi pluton, C and D: clearly show that some anorthosite veins cross cutted the each other.

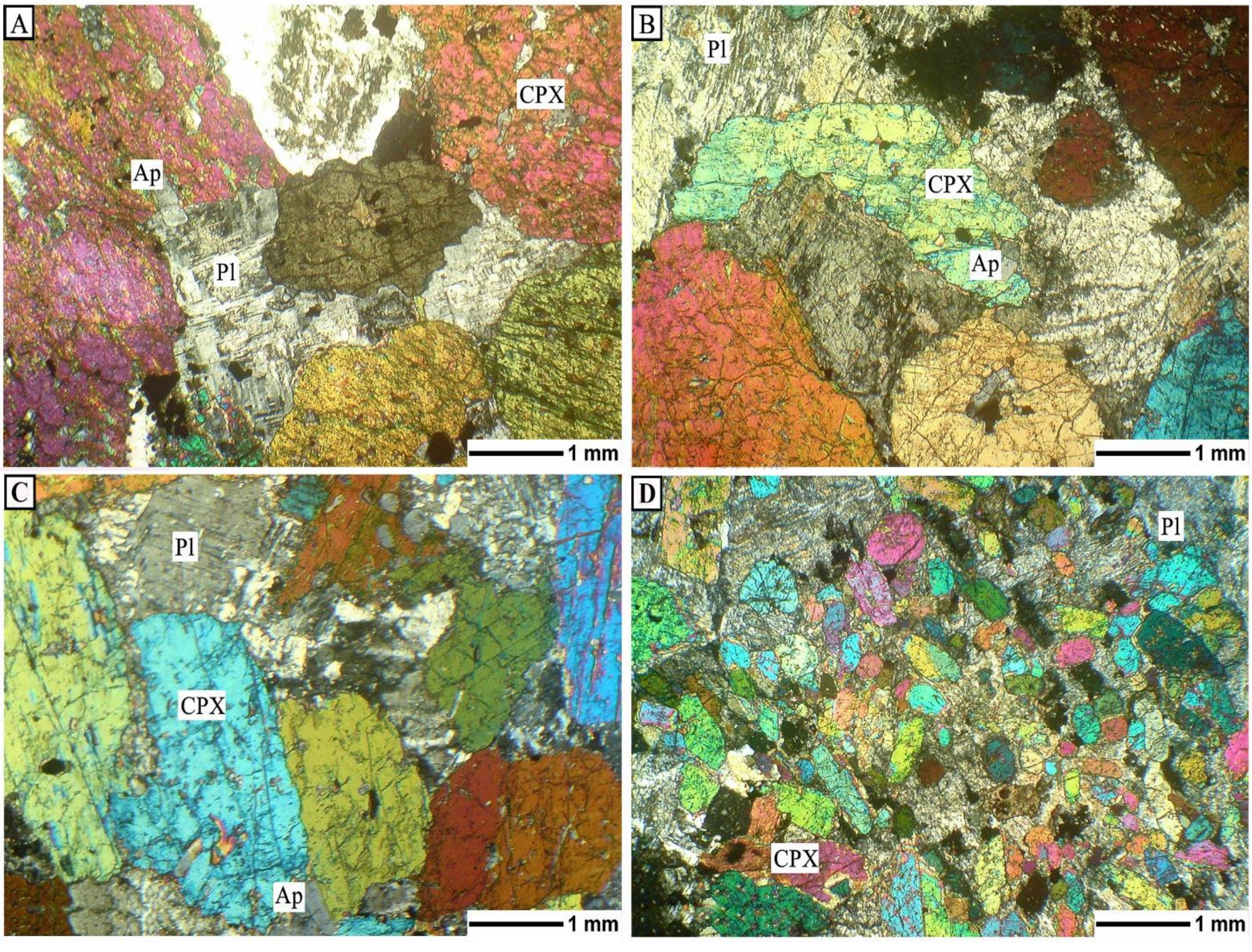
پتروگرافی آنورتوزیت‌ها

آنورتوزیت‌ها در نمونه دستی سنگ‌هایی روشن رنگ و دانه‌درشت هستند. این سنگ‌ها از نظر پتروگرافی، دارای کانی اصلی پلاژیوکلاز و کانی‌های فرعی زیرکن و اسفن هستند (شکل ۵– A، B، C و D). مرز بین رگه‌های آنورتوزیتی و گابروها کاملاً واضح بوده و در بعضی از رگه‌های آنورتوزیت، قطعه‌های کوچکی از گابرو نیز دیده می‌شود (شکل ۵– C و D). در برخی موارد مشخص است که یک رگه آنورتوزیت رگه‌های دیگر را

DOI: 10.22067/ECONG.2021.68737.1008

قطع‌کرده اســت کـه نشـــان‌دهنـده وجود دســـت‌کم دو فـاز آنورتوزیت‌زایی و تشــکیل آنورتوزیت‌ها هم‌زمان با فعالیت‌های زمین‌ساختی در این منطقه است. قطع‌شدن رگه‌های آنورتوزیتی به وسیله یکدیگر در شکل ۳-C و D نشان‌داده شده است.

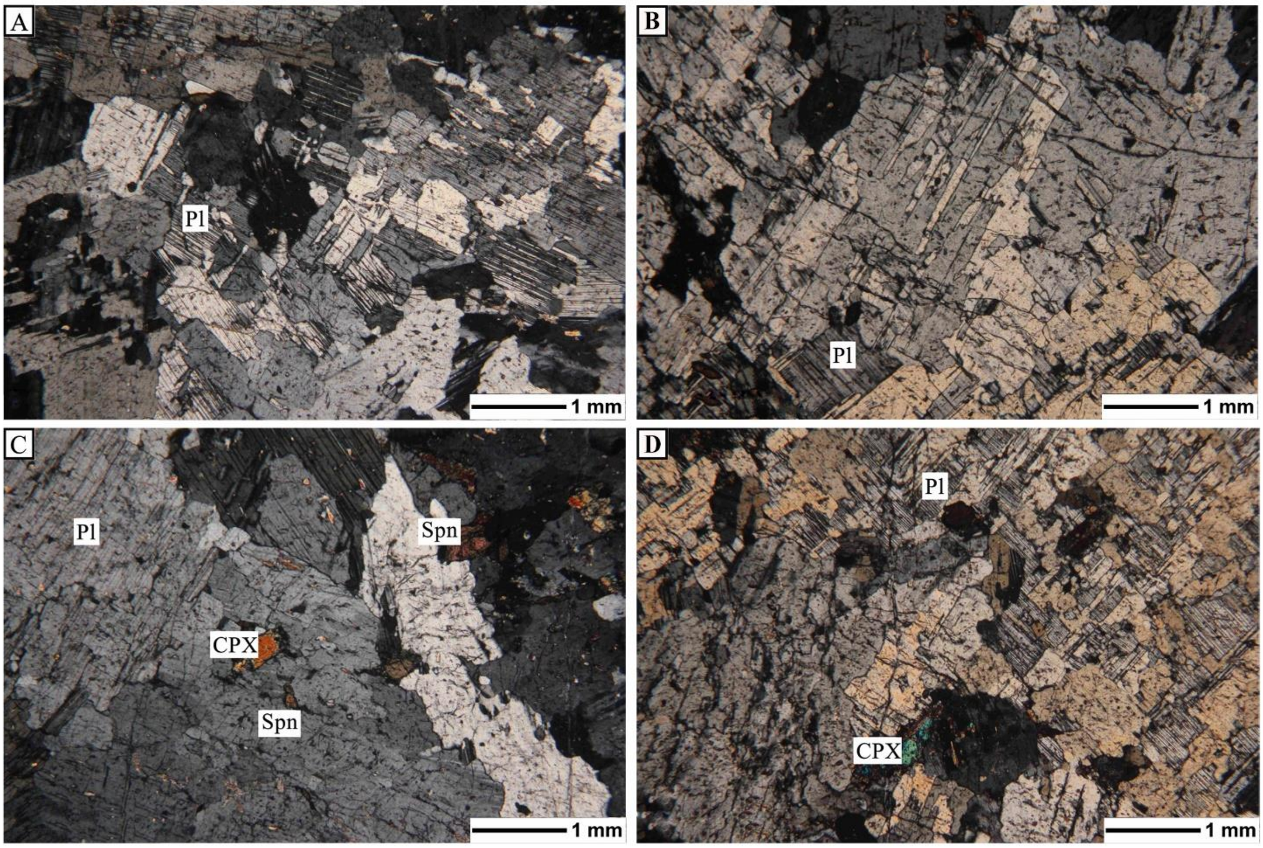
پلاژیوکلاز بیش از ۹۰ درصـد حجمی آنورتوزیت‌های منطقه را به خود اختصاص‌داده است. این پلاژیوکلازها به صورت شکل‌دار تا نیمه‌شـکل‌دار بوده و اغلب سـالم و بدون دگرسـانی هسـتند (شـکل ۵). اندازه پلاژیوکلازهای موجود در آنورتوزیت‌ها به ۱۰ میلی‌متر نیز می‌رســد. پلاژیوکلازهای آنورتوزیـت‌ها با پلاژیوکلازهای موجود در گابروها از نظر پتروگرافی و ویژگی‌های کانی‌شــناســی (اندازه بلورها، زاویه خاموشی و ریخت‌شناسی پلاژیوکلاز) بسیار مشابه هسـتند. زیرکن با برجستگی زیاد و با هاله پلیوکروئیک زرد تا قهوه‌ای کم رنگ، به صــورت ادخال در درون برخی بلورهای پلاژیوکلاز دیده می‌شود



شکل ٤. تصویرهای میکروسکوپی گابروهای دربرگیرنده رگه‌های آنورتوزیتی در منطقه کالکافی (XPL). A، B و C: بلورهای درشت کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز دارای ادخال‌هایی از آپاتیت و D: بلورهای کلینوپیروکسـن و پلاژیوکلاز با اندازه متوسـط. علائم اختصـاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس‌شده است (Cpx: کلینوپیروکسن، Pl : پلاژیوکلاز، Ap: آپاتیت).

Fig. 4. Photomicrographs of gabbros including anorthosite veins of the Kal-e-Kafi area (XPL). A, B and C: Growth grains Clinopyroxene and Plagioclase with Apatite inclusions, and D: Clinopyroxene and Plagioclase with medium size. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Cpx: Clinopyroxene, Pl: Plagioclase, Ap: Apatite).

DOI: 10.22067/ECONG.2021.68737.1008



شکل ۵. تصویرهای میکروسکوپی از کانی‌های موجود در آنورتوزیت‌های کالکافی(XPL). A و B: آنورتوزیت با بافت گرانولار، C و D: آنورتوزیت با مقادیر فراوان پلاژیوکلاز. اسفن و کلینوپیروکسن کانی‌های فرعی هستند. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس‌شده است (Pl: پلاژیوکلاز، Cpx: کلینوپیروکسن، Spn: اسفن).

Fig. 5. Photomicrographs of rock-forming minerals of the Kal-e- Kafi anorthosites (XPL). A and B: Anorthosite with granular texture, C and D: Anorthosite with high values of Plagioclase. Sphene and Clinopyroxene are minor minerals. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Pl: Plagioclase, Cpx: Clinopyroxene, Spn: Sphene).

شیمی کانی

بررسی‌های آنالیز شیمی کانی‌های گابروها فقط بر روی گابروهایی انجام شد که دارای رگه‌های آنورتوزیتی بودند. این گابروها از نوع مزوگابرو هستند. بر اساس نتایج آنالیز نقطه‌ای کانی‌ها با استفاده از دستگاه میکروپروب، پلاژیوکلازهای سالم موجود در گابروها، در محدوده آنورتیت (An= ۸۴-۹۴٪) قرار می‌گیرند (جدول ۱ و شکل ۶-A). ترکیب پلاژیوکلازهای دگرسان موجود در گابروها از نوع بیتونیت (An= ۷۲٪)، آندزین (An= ۳۵-۴۴٪) و الیگوکلاز (An= ۱۷-۲۶٪) است. در اثر دگرسانی، ترکیب پلاژیوکلازها به تدریج از کلسیک به سمت سدیک تغییر پیدا می‌کند؛ یعنی با افزایش درجه دگرسانی پلاژیوکلازها، از مقدار کلسیم کاسته شده و به مقدار سدیم افزوده می‌شود.

بررسی شیمی پلاژیوکلازهای موجود در آنورتوزیت‌ها نیز نشان می‌دهد که پلاژیوکلازهای سالم و اولیه دارای ترکیب آنورتیت (An= ۸۹-۹۵٪) بوده و پلاژیوکلازهای حاصل از دگرسانی پلاژیوکلازهای سالم و اولیه (تغییر در مقادیر CaO و Na_2O) از نوع بیتونیت (An= ۸۲-۸۶٪) و لابرادوریت (An= ۵۰-۶۲٪) هستند (جدول ۱ و شکل ۶-A).

DOI: 10.22067/ECONG.2021.68737.1008

مقایســه ترکیب شــیمیایی عناصــر اصــلی و فرمول ســاختاری پلاژیوکلازهای اولیه گابروها و آنورتوزیت‌ها نشان می‌دهد که این کانی در هر دو سنگ دارای ترکیب شیمیایی بسیار نزدیک بوده و بررسی‌های پتروگرافی نشـان می‌دهد که کلینوپیروکسـن‌ها قبل از آنها متبلور شده‌اند.

جدول ۱. نتایج آنالیز میکروپروب (بر اساس wt.%) و محاسبه فرمول ساختاری فلدسپارها (بر اساس ۸اتم اکسیژن) در مزوگابروها و آنورتوزیت‌های موجود در منطقه کالکافی

Table 1. Electron microprobe analyses (wt.%) and calculated structural formula of the feldspars (based on the 8 Oxygens) in the Kal-e-Kafi mesogabbros and anorthosites.

Rock Type	**Gabbro**									
Sample no.	**B811-3**	**B811-3**	**B811-3**	**B811-3**	**B811-3**	**B811-3**	**B811-3**	**B811-3**	**B811-3**	**B811-1**
Point no.	**45**	**46**	**48**	**49**	**47**	**51**	**52**	**59**	**63**	**21**
SiO_2	65.93	65.49	65.55	65.78	63.57	64.41	61.89	56.69	56.13	49.83
TiO_2	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00
Al_2O_3	18.30	18.31	18.20	18.14	22.12	22.19	23.54	26.52	26.55	32.08
FeO*	0.07	0.10	0.05	0.20	0.21	0.24	0.27	0.35	0.25	0.11
MnO	0.01	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00
MgO	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.04	0.13	0.30	0.16	0.01
CaO	0.01	0.04	0.01	0.01	3.68	3.74	5.39	7.57	8.99	14.72
Na_2O	1.15	2.52	0.68	0.94	9.43	9.38	8.19	7.27	6.27	2.74
K_2O	15.02	13.44	15.73	15.45	0.44	0.30	0.57	0.76	0.27	0.62
Sum	100.50	99.94	100.25	100.53	99.47	100.31	100.01	99.49	98.63	100.12
Oxygen#	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Si	3.014	3.001	3.013	3.014	2.828	2.837	2.752	2.567	2.558	2.274
Ti	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
Al	0.985	0.988	0.985	0.979	1.159	1.151	1.232	1.414	1.425	1.724
Fe^{3+}	0.003	0.004	0.002	0.008	0.008	0.009	0.010	0.013	0.010	0.004
Fe^{2+}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mn	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
Mg	0.001	0.002	0.000	0.000	0.000	0.003	0.009	0.020	0.011	0.000
Ca	0.000	0.002	0.000	0.000	0.176	0.177	0.257	0.367	0.439	0.720
Na	0.102	0.224	0.060	0.083	0.813	0.801	0.706	0.639	0.554	0.242
K	0.876	0.786	0.923	0.903	0.025	0.017	0.033	0.044	0.016	0.036
Sum	4.981	5.008	4.985	4.987	5.010	4.995	5.000	5.065	5.013	5.000
End Members:										
Albite	10.400	22.100	6.100	8.400	80.200	80.500	70.900	60.900	54.900	24.200
Anorthite	0.000	0.200	0.000	0.000	17.400	17.800	25.800	35.000	43.500	72.100
Orthoclase	89.600	77.700	93.900	91.600	2.400	1.700	3.300	4.100	1.600	3.700
Classification	Orthoclase				Oligoclase			Andesine		Bytownite

DOI: 10.22067/ECONG.2021.68737.1008   زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۴۰۱، دوره ۱۴، شماره ۲

ادامه جدول ۱. نتایج آنالیز میکروپروب (بر اساس wt.%) و محاسبه فرمول ساختاری فلدسپارها (بر اساس ۸ اتم اکسیژن) در مزوگابروها و آنورتوزیت‌های موجود در منطقه کالکافی

Table 1 (Continued). Electron microprobe analyses (wt.%) and calculated structural formula of the feldspars (based on the 8 Oxygens) in the Kal-e-Kafi mesogabbros and anorthosites.

Rock Type	**Gabbro**						**Anorthosite**		
Sample no.	**B811-1**	**B811-1**	**B811-1**	**B811-1**	**B811-2**	**B811-2**	**B811-1**	**B811-3**	**B811-3**
Point no.	**15**	**16**	**18**	**19**	**36**	**43**	**24**	**56**	**58**
SiO_2	46.64	44.90	44.38	43.92	44.27	44.19	52.07	52.98	54.40
TiO_2	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
Al_2O_3	33.84	34.79	35.18	34.02	35.41	35.42	30.09	29.83	28.52
FeO*	0.29	0.27	0.17	1.23	0.18	0.20	0.11	0.23	0.17
MnO	0.01	0.00	0.00	0.07	0.01	0.00	0.02	0.00	0.01
MgO	0.03	0.03	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.03	0.03
CaO	16.64	18.54	19.07	19.75	19.13	19.37	13.10	12.51	10.37
Na_2O	0.68	0.92	0.75	0.70	0.54	0.74	3.89	4.36	4.99
K_2O	1.66	0.11	0.01	0.02	0.18	0.06	0.74	0.07	1.11
Sum	99.78	99.55	99.59	99.70	99.72	99.97	100.01	100.02	99.61
Oxygen#	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Si	2.157	2.083	2.060	2.055	2.054	2.047	2.371	2.400	2.472
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
Al	1.843	1.901	1.923	1.875	1.934	1.933	1.613	1.591	1.526
Fe^{3+}	0.011	0.011	0.006	0.048	0.007	0.008	0.004	0.009	0.006
Fe^{2+}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mn	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001
Mg	0.002	0.002	0.002	0.000	0.001	0.000	0.000	0.002	0.002
Ca	0.825	0.922	0.949	0.990	0.951	0.961	0.639	0.607	0.505
Na	0.061	0.083	0.068	0.063	0.048	0.066	0.343	0.383	0.440
K	0.098	0.006	0.001	0.001	0.011	0.004	0.043	0.004	0.064
Sum	4.997	5.008	5.009	5.035	5.006	5.019	5.014	4.997	5.016
				End members:					
Albite	6.200	8.200	6.700	6.000	4.800	6.400	33.500	38.500	43.600
Anorthite	83.800	91.200	93.200	93.900	94.200	93.200	62.300	61.100	50.000
Orthoclase	10.000	0.600	0.100	0.100	1.000	0.400	4.200	0.400	6.400
Classification			Anorthite					Labradorite	

ادامه جدول ۱. نتایج آنالیز میکروپروب (بر اساس wt.%) و محاسبه فرمول ساختاری فلدسپارها (بر اساس ۸ اتم اکسیژن) در مزوگابروها و آنورتوزیت‌های موجود در منطقه کالکافی

Table 1 (Continued). Electron microprobe analyses (wt.%) and calculated structural formula of the feldspars (based on the 8 Oxygens) in the Kal-e-Kafi mesogabbros and anorthosites.

Rock Type	**Anorthosite**							
Sample no.	**B811-1**	**B811-3**	**B811-3**	**B811-1**	**B811-1**	**B811-1**	**B811-1**	**B811-2**
Point no.	**28**	**53**	**54**	**25**	**26**	**27**	**29**	**42**
SiO_2	45.24	47.32	47.41	45.26	44.04	43.94	44.55	44.51
TiO_2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al_2O_3	34.50	33.38	33.26	35.19	34.79	35.28	35.08	34.93
FeO*	0.15	0.24	0.21	0.20	0.20	0.21	0.21	0.15
MnO	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00
MgO	0.00	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	17.99	16.83	16.96	18.33	19.87	19.62	19.09	18.62
Na_2O	1.63	1.99	1.85	0.73	0.56	0.47	0.56	1.17
K_2O	0.03	0.02	0.02	0.27	0.31	0.08	0.01	0.01
Sum	99.55	99.80	99.74	100.00	99.77	99.60	99.51	99.38
Oxygen#	8	8	8	8	8	8	8	8
Si	2.098	2.177	2.182	2.087	2.051	2.044	2.068	2.070
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al	1.884	1.809	1.803	1.911	1.908	1.933	1.918	1.913
Fe^{3+}	0.006	0.009	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.006
Fe^{2+}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
Mg	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.00	0.000
Ca	0.894	0.830	0.836	0.906	0.991	0.978	0.950	0.928
Na	0.146	0.178	0.165	0.065	0.050	0.042	0.050	0.106
K	0.002	0.001	0.001	0.016	0.018	0.005	0.000	0.000
Sum	5.030	5.005	4.996	4.994	5.026	5.010	4.995	5.023
End Members:								
Albite	14.000	17.600	16.500	6.600	4.700	4.100	5.000	10.300
Anorthite	85.800	82.300	83.400	91.800	93.600	95.400	95.000	89.700
Orthoclase	0.200	0.100	0.100	1.600	1.700	0.500	0.000	0.000
Classification	Bytownite			Anorthite				

نتایج آنالیز نقطه‌ای کلینوپیروکسن‌های موجود در گابروهای منطقه کالکافی به همراه محاسبه فرمول ساختاری و تعیین اعضای پایانی این کانی‌ها در جدول ۲ ارائه‌شده است. کلینوپیروکسن از کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده گابروهای کالکافی است. بررسی شیمی‌کانی کلینوپیروکسن‌های موجود در مزوگابروهای منطقه کالکافی بیانگر آن است که این کانی‌ها از دسته پیروکسن‌های غنی از آهن، کلسیم و منیزیم هستند و در نمودار Q - J در محدوده Quad قرار می‌گیرند (شکل ۶-B). کلینوپیروکسن‌های موجود در گابروها دارای ترکیب دیوپسید هستند (جدول ۲ و شکل ۶-C). Mg# کلینوپیروکسن‌های موجود در گابروها برابر با ۶۷/۸۲ تا ۷۸/۶۱ درصد است (جدول ۲). نمودار Al^{IV} در برابر Al^{VI} علاوه بر تفکیک کلینوپیروکسن‌های آذرین و دگرگونی از یکدیگر، محدوده فشار تبلور آنها را نیز نشان می‌دهد. کلینوپیروکسن‌های موجود در گابروها در فشارهای متوسط تا کم متبلور شدند (شکل ۶-D). بنابراین از ویژگی‌های این کانی می‌توان در بررسی پتروژنز و شرایط تشکیل ماگما استفاده کرد. به این منظور، از آنالیز LA-ICP-MS، برای دستیابی به مقادیر عناصر نادر خاکی و کمیاب موجود در کلینوپیروکسن‌ها و پلاژیوکلازها استفاده شده است (جدول ۳).

بررسی ترکیب شیمیایی کانی‌های پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن در گابروها و آنورتوزیت‌های کالکافی

بررسی‌های شیمی‌کانی بیانگر آن است که پلاژیوکلازها و کلینوپیروکسن‌های موجود در نمونه‌های مورد آنالیز به ترتیب دارای ترکیب غالب آنورتیت و دیوپسید هستند. کانی دیوپسید از کانی‌های آذرین اولیه در این سنگ‌هاست که ترکیب شیمیایی این کانی‌ها می‌تواند برای ارزیابی ویژگی‌های منشأ تشکیل آنها مورد استفاده قرار گیرد.

الگوی عناصر نادر خاکی بهنجارشده به ترکیب کندریت برای کلینوپیروکسن‌ها بیانگر آن است که همه نمونه‌ها دارای غنی‌شدگی نسبت به ترکیب کندریت هستند (شکل ۷-A). همچنین مقادیر LREEs در این نمونه‌ها نسبت به HREEs دارای غنی‌شدگی است و نسبت Ce/Yb بهنجارشده به ترکیب کندریت در این کانی‌ها برابر با ۶/۵۵ تا ۹/۷۵ است. روند کلی کلینوپیروکسن‌ها در نمودار بهنجارشده نسبت به ترکیب کندریت نشان می‌دهد که LREEs دارای یک الگوی خمیده به سمت بالا (محدب) هستند که این روند احتمالاً به تبلور همزمان کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز اشاره می‌کند (Ashchepkov and André, 2002). در طول تبلور این دو کانی، LREEs بیشتر ترجیح می‌دهند که وارد ساختمان پلاژیوکلاز شوند که این مسئله به وسیله آنومالی منفی Sr در نمودار بهنجارشده کلینوپیروکسن نسبت به گوشته اولیه نیز قابل تشخیص است (شکل ۷-B). این نمودار نشان می‌دهد که مقدار Sr در پلاژیوکلاز از مقدار آن در کلینوپیروکسن بیشتر است. از بین کانی‌های مختلف، پیروکسن‌ها و گارنت منشأ HREEs محسوب می‌شوند و LREEs بیشتر در فلدسپارها تجمع می‌کنند. بررسی کلینوپیروکسن‌ها در گابروهای کالکافی در نمودار بهنجارشده نسبت به گوشته اولیه نشان‌دهنده غنی‌شدگی از HREEs و تهی‌شدگی از LILEs و HFSEs نسبت به ترکیب گوشته اولیه است (شکل ۷-B). تهی‌شدگی از عناصر Rb، Ba، Th، Nb، Ta و K و آنومالی منفی عناصر Zr و Ti در الگوی این کانی‌ها دیده می‌شود (شکل ۷-B). آنومالی منفی Eu در نمودار بهنجارشده کلینوپیروکسن‌ها نسبت به کندریت نشان می‌دهد که Eu تمایل بیشتری به ورود در ساختار پلاژیوکلاز دارد تا اینکه بخواهد وارد کلینوپیروکسن شود. نمودار بهنجارسازی پلاژیوکلازها نسبت به کندریت نشان می‌دهد که در پلاژیوکلازها مقدار LREEs بیشتر از HREEs بوده و Eu دارای آنومالی مثبت واضحی است. Eu درساختار پلاژیوکلازها جایگزین Ca می‌شود. HREEs نسبت به LREEs پراکندگی بیشتری از خود نشان می‌دهند که بخشی از این موضوع ممکن است مربوط به مقدار بسیار کم HREEs و بخشی دیگر نیز به دقت دستگاه آنالیز در تعیین مقادیر کم این عناصر مربوط باشد (شکل ۷-C و D).

DOI: 10.22067/ECONG.2021.68737.1008

جدول ۲. نتایج آنالیز میکروپروب (بر اساس wt.%) و محاسبه فرمول ساختاری کلینوپیروکسن‌ها (بر اساس ۶ اتم اکسیژن) در مزوگابروهای موجود در منطقه کالکافی

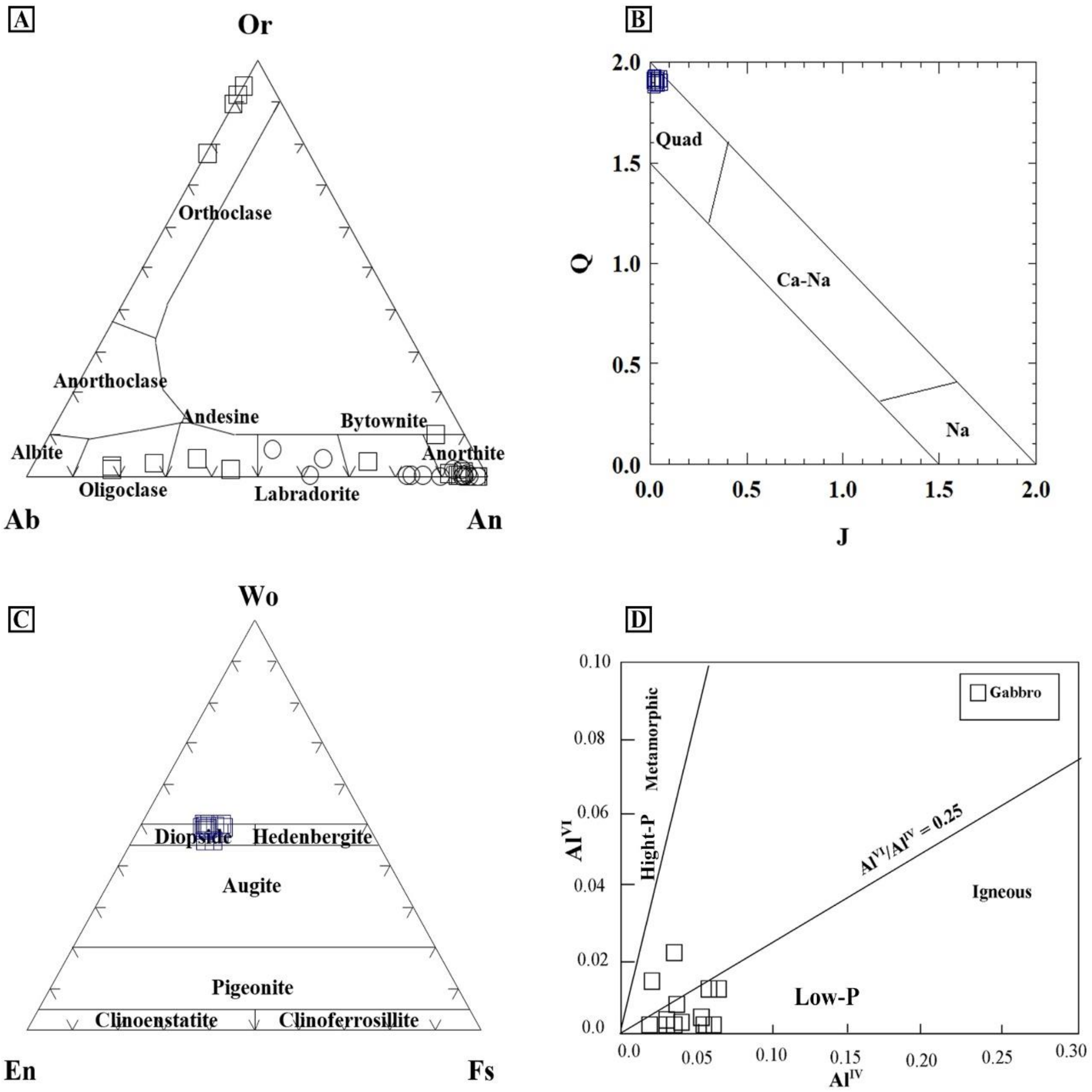
Table 2. Electron microprobe analyses (wt.%) and calculated structural formula of the clinopyroxenes (based on the 6 Oxygens) in the Kal-e-Kafi mesogabbros.

Rock Type	**Gabbro**								
Sample no.	**B811-1**	**B811-1**	**B811-1**	**B811-1**	**B811-1**	**B811-1**	**B811-1**	**B811-1**	**B811-1**
Point no.	**10**	**11**	**17**	**20**	**22**	**23**	**7**	**8**	**9**
SiO_2	52.42	52.08	52.60	52.43	52.37	52.82	52.13	52.83	52.65
TiO_2	0.04	0.09	0.07	0.08	0.07	0.06	0.08	0.06	0.08
Al_2O_3	1.16	1.00	1.06	1.08	0.81	0.83	1.20	0.79	1.27
Cr_2O_3	0.05	0.04	0.03	0.00	0.06	0.00	0.06	0.04	0.07
FeO*	8.29	8.71	8.21	7.94	9.53	8.47	8.26	8.70	8.26
MnO	0.85	0.74	0.85	0.80	0.82	0.73	0.81	0.65	0.85
MgO	12.64	12.55	12.60	13.01	11.88	12.93	12.81	12.80	12.38
CaO	24.53	24.04	24.50	24.45	24.32	23.87	24.27	23.93	24.31
Na_2O	0.17	0.30	0.25	0.24	0.19	0.31	0.22	0.29	0.25
K_2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00
NiO	0.00	0.00	0.03	0.00	0.07	0.01	0.03	0.00	0.04
Sum	100.15	99.54	100.19	100.03	100.11	100.03	99.89	100.08	100.15
Oxygen#	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Si	1.960	1.960	1.966	1.957	1.971	1.974	1.952	1.976	1.970
Ti	0.001	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
$Al^{(IV)}$	0.040	0.040	0.034	0.043	0.029	0.026	0.048	0.024	0.030
$Al^{(VI)}$	0.011	0.004	0.012	0.005	0.007	0.011	0.005	0.011	0.026
Cr	0.002	0.001	0.001	0.000	0.002	0.000	0.002	0.001	0.002
Fe^{3+}	0.036	0.052	0.036	0.051	0.029	0.034	0.053	0.030	0.016
Fe^{2+}	0.223	0.222	0.221	0.197	0.270	0.231	0.206	0.243	0.242
Mn	0.027	0.024	0.027	0.025	0.026	0.023	0.026	0.021	0.027
Mg	0.705	0.704	0.702	0.724	0.667	0.721	0.715	0.714	0.691
Ca	0.983	0.969	0.981	0.978	0.981	0.956	0.974	0.959	0.975
Na	0.012	0.022	0.018	0.017	0.014	0.023	0.016	0.021	0.018
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
Ni	0.000	0.000	0.001	0.000	0.002	0.000	0.001	0.000	0.001
Sum	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	3.999	4.000	4.000
Fe#	24.03	23.97	23.94	21.39	28.82	24.26	22.37	25.39	25.94
Mg#	75.97	76.03	76.06	78.61	71.18	75.74	77.63	74.61	74.06
End Members:									
Wollastonite	49.796	49.183	49.882	49.511	49.703	48.669	49.344	48.799	49.961
Enstatite	35.702	35.719	35.706	36.662	33.779	36.687	36.246	36.307	35.405
Ferrosillite	14.502	15.098	14.412	13.827	16.518	14.644	14.410	14.894	14.634
Classification	Diopside								

ادامه جدول ۲. نتایج آنالیز میکروپروب (بر اساس wt.%) و محاسبه فرمول ساختاری کلینوپیروکسن‌ها (بر اساس ۶ اتم اکسیژن) در مزوگابروهای موجود در منطقه کالکافی

Table 2 (Continued). Electron microprobe analyses (wt.%) and calculated structural formula of the clinopyroxenes (based on the 6 Oxygens) in the Kal-e-Kafi mesogabbros.

Rock Type				**Gabbro**				
Sample no.	**B811-2**	**B811-2**	**B811-2**	**B811-2**	**B811-2**	**B811-3**	**B811-3**	**B811-3**
Point no.	**33**	**34**	**38**	**41**	**44**	**50**	**60**	**62**
SiO_2	52.02	52.35	51.15	52.35	52.22	52.25	52.58	53.49
TiO_2	0.07	0.10	0.08	0.11	0.05	0.07	0.03	0.07
Al_2O_3	1.32	1.52	1.23	1.50	0.83	0.56	0.41	0.67
Cr_2O_3	0.00	0.01	0.01	0.05	0.00	0.00	0.04	0.07
FeO*	8.61	8.15	10.42	7.95	10.59	10.76	10.86	9.52
MnO	0.88	0.91	0.92	0.80	1.06	0.67	0.54	0.59
MgO	12.35	12.67	11.30	12.74	11.18	12.63	11.70	13.24
CaO	24.60	24.66	24.79	24.81	24.28	22.63	23.35	22.65
Na_2O	0.16	0.13	0.15	0.16	0.19	0.29	0.39	0.44
K_2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05
NiO	0.00	0.02	0.01	0.05	0.05	0.02	0.04	0.00
Sum	100.02	100.50	100.07	100.53	100.43	99.87	99.93	100.78
Oxygen#	6	6	6	6	6	6	6	6
Si	1.951	1.950	1.933	1.948	1.969	1.969	1.986	1.986
Ti	0.002	0.003	0.002	0.003	0.001	0.002	0.001	0.002
$Al^{(IV)}$	0.049	0.050	0.055	0.052	0.031	0.025	0.014	0.014
$Al^{(VI)}$	0.009	0.017	0.000	0.014	0.006	0.000	0.004	0.015
Cr	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.001	0.002
Fe^{3+}	0.047	0.036	0.086	0.042	0.036	0.055	0.035	0.027
Fe^{2+}	0.223	0.217	0.243	0.206	0.298	0.284	0.308	0.268
Mn	0.028	0.029	0.030	0.025	0.034	0.022	0.017	0.018
Mg	0.691	0.704	0.637	0.707	0.628	0.709	0.659	0.733
Ca	0.989	0.984	1.003	0.989	0.981	0.913	0.945	0.901
Na	0.011	0.009	0.011	0.011	0.014	0.021	0.028	0.031
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002
Ni	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000
Sum	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	3.998
Fe#	24.40	23.56	27.61	22.56	32.18	28.60	31.85	26.77
Mg#	75.60	76.44	72.39	77.44	67.82	71.40	68.15	73.23
				End Members:				
Wollastonite	49.999	49.948	50.197	50.248	49.612	46.060	48.113	46.259
Enstatite	34.930	35.717	31.854	35.901	31.785	35.768	33.541	37.617
Ferrosillite	15.071	14.335	17.949	13.851	18.603	18.172	18.346	16.124
Classification				Diopside				



شکل ۶. نمودارهای بررسی ترکیب شیمیایی کانی‌های موجود در مزوگابرو و آنورتوزیت‌های منطقه کالکافی، A: مثلث تقسیم بندی فلدسپارها اقتباس از دیر و همکاران (Deer et al., 1992)، B و C: نمودارهای تقسیم‌بندی کلینوپیروکسن‌های گابروهای منطقه اقتباس از دیر و همکاران (Deer et al., 1992) و D: نمودار Al^{IV} در برابر Al^{VI} برگرفته از آوکی و شیبا (Aoki and Shiba, 1973)

Fig. 6. Chemical composition graphs of the minerals in the mesogabbros and anorthosites of the Kal-e-Kafi area, A: Feldspars classification ternary diagram (Deer et al., 1992), B and C: Classification graphs of clinopyroxenes in the gabbros (Deer et al., 1992), and D: Al^{IV} versus Al^{VI} plot (Aoki and Shiba, 1973)

در نمودار نرمالیز به گوشته اولیه، پلاژیوکلازها آنومالی مثبت Rb، Pb، Sr و Eu از خود نشـان می‌دهند و Zr و Ti نیز آنومالی منفی دارند. Ti ترجیح می‌دهد که وارد سـاختار کلینوپیروکسـن شـود.

مقایسـه نتایج آنالیز کلینوپیروکسـن‌ها نسـبت به پلاژیوکلازها نیز نشان می‌دهد که کلینوپیروکسن‌ها، REE بیشتری دارند؛ در عوض فلدسپارها Rb، Sr، Pb و Ba بیشتری دارند (شکل ۷-E و F).

DOI: 10.22067/ECONG.2021.68737.1008

جدول ۳. نتایج آنالیزهای میکروپروب (عناصر اصلی، بر اساس wt.%) و LA-ICP-MS (عناصر کمیاب، بر اساس ppm) پلاژیوکلازها و کلینوپیروکسن‌های موجود در مزوگابروها و آنورتوزیت‌های منطقه کالکافی

Table 3. Electron microprobe (major elements) and LA-ICP-MS (trace elements) analyses of clinopyroxenes and plagioclases from the Kal-e-Kafi mesogabbros and anorthosites. Major and trace elements presented in (wt.%) and (ppm), respectively.

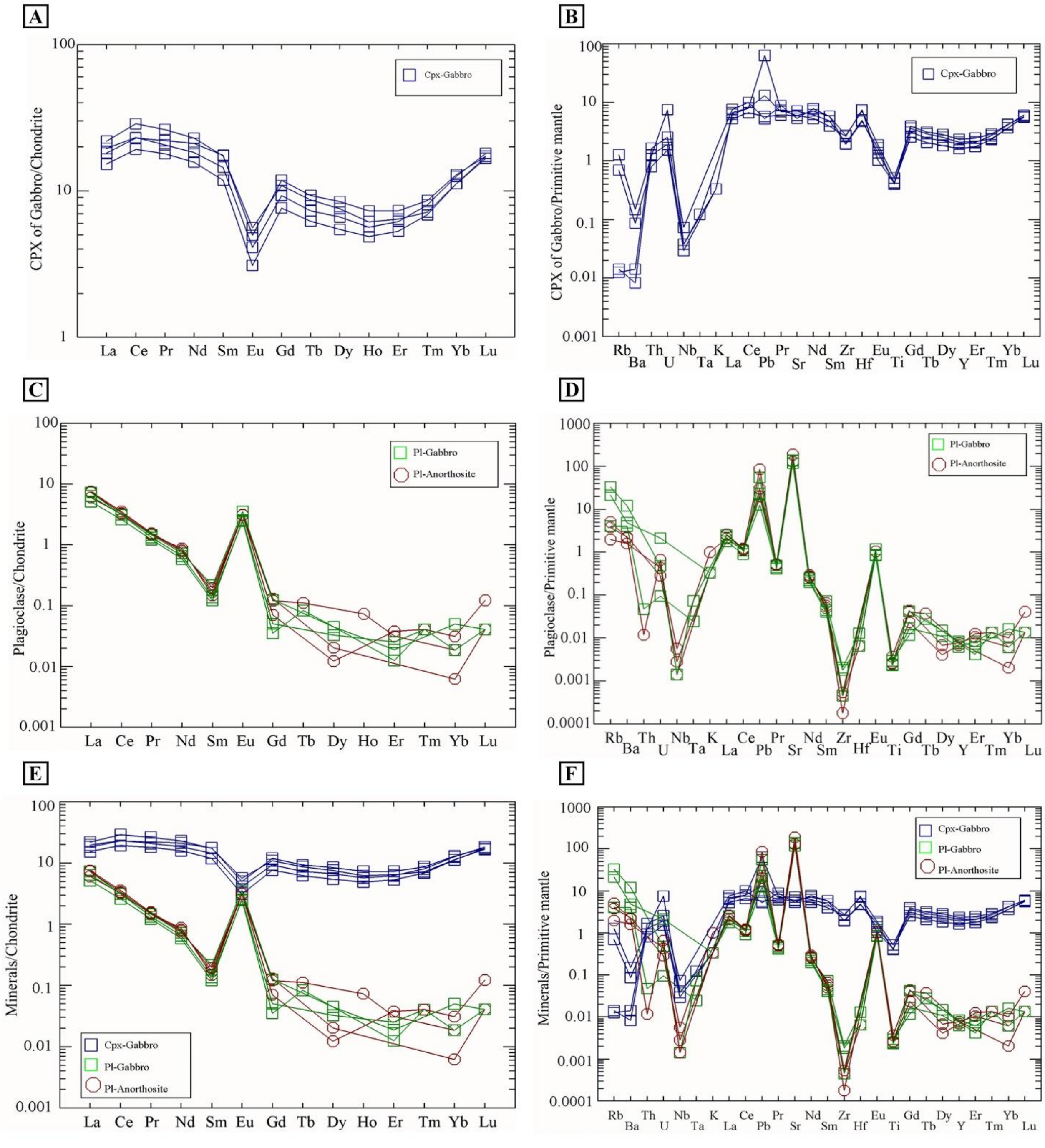
Rock type	**Gabbro**			
Mineral	**Diopside**			
Sample/Point no.	**B811-1/7**	**B811-1/8**	**B811-1/34**	**B811-1/38**
SiO_2	52.13	52.83	52.35	51.15
TiO_2	0.08	0.06	0.10	0.08
Al_2O_3	1.20	0.76	1.52	1.23
Cr_2O_3	0.06	0.03	0.00	0.01
FeO*	8.26	8.70	8.15	10.42
MnO	0.81	0.65	0.91	0.92
MgO	12.81	12.80	12.67	11.30
CaO	24.27	23.93	24.66	24.79
Na_2O	0.22	0.29	0.13	0.15
K_2O	0.01	0.01	0.00	0.00
NiO	0.03	0.00	0.02	0.04
Total	99.89	100.05	100.51	100.09
Li	14.987	12.414	9.395	13.458
Ti	519.897	551.093	541.846	664.310
Rb	0.810	0.440	0.009	0.008
Sr	125.841	150.183	126.237	112.735
Y	10.571	8.821	7.389	9.481
Zr	21.550	22.914	29.342	30.462
Nb	0.027	0.021	0.027	0.052
Ba	1.035	0.602	0.058	0.099
La	4.292	4.625	3.607	5.178
Ce	14.043	14.189	11.816	17.594
Pr	2.042	1.912	1.667	2.434
Nd	9.617	8.379	7.197	10.474
Sm	2.593	2.138	1.751	2.572
Eu	0.280	0.231	0.174	0.315
Gd	2.348	1.849	1.518	2.158
Tb	0.335	0.263	0.224	0.313
Dy	2.077	1.633	1.340	1.862
Ho	0.398	0.309	0.266	0.336
Er	1.169	0.987	0.849	1.025
Tm	0.212	0.198	0.170	0.177
Yb	2.082	2.025	1.803	1.804
Lu	0.425	0.445	0.423	0.410
Hf	1.455	1.520	2.320	2.206
Ta	0.001	0.000	0.005	0.002
Pb	11.631	2.416	1.053	0.964
Th	0.105	0.068	0.108	0.139
U	0.157	0.032	0.040	0.053
Ce/Yb	6.745	7.007	6.553	9.753

ادامه جدول ۳. نتایج آنالیزهای میکروپروب (عناصر اصلی، بر اساس wt.%) و LA-ICP-MS (عناصر کمیاب، بر اساس ppm) پلاژیوکلازها و کلینوپیروکسن‌های موجود در مزوگابروها و آنورتوزیت‌های منطقه کالکافی

Table 3 (Continued). Electron microprobe (major elements) and LA-ICP-MS (trace elements) analyses of clinopyroxenes and plagioclases from the Kal-e-Kafi mesogabbros and anorthosites. Major and trace elements presented in (wt.%) and (ppm), respectively.

Rock type	Anorthosite				Gabbro	
Mineral	Plagioclase					
Sample/Point no.	B811-1/4	B811-1/5	B811-1/6	B811-1/12	B811-2/32	B811-2/37
SiO_2	43.93	43.72	44.58	44.09	43.67	43.75
TiO_2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Al_2O_3	35.38	34.66	35.33	35.77	35.57	35.45
FeO*	0.20	0.18	0.20	0.22	0.28	0.20
MnO	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01
MgO	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
CaO	19.49	20.50	19.43	19.59	19.78	20.16
Na_2O	0.65	0.61	0.47	0.26	0.25	0.26
K_2O	0.01	0.03	0.01	0.01	0.00	0.01
NiO	0.02	0.03	0.02	0.00	0.00	0.02
Total	99.68	99.74	100.05	99.95	99.58	99.85
Li	4.014	3.414	0.964	2.701	10.365	25.243
Ti	3.405	3.266	4.787	3.165	3.831	3.012
Rb	3.216	1.244	2.418	2.557	20.956	13.523
Sr	2727.142	2732.426	3960.466	2911.711	2830.399	2497.493
Y	0.031	0.035	0.035	0.034	0.038	0.028
Zr	0.006	0.002	0.005	0.023	0.020	0.005
Nb	0.001	0.004	0.002	ND	0.001	ND
Ba	15.036	11.104	15.927	28.282	84.523	34.068
La	1.724	1.433	1.780	1.516	1.720	1.217
Ce	2.055	1.965	2.174	1.913	1.934	1.600
Pr	0.140	0.135	0.145	0.136	0.123	0.113
Nd	0.352	0.398	0.370	0.333	0.300	0.269
Sm	0.029	0.022	0.025	0.032	0.020	0.018
Eu	0.177	0.174	0.177	0.200	0.140	0.145
Gd	0.014	0.024	0.026	0.025	0.007	0.010
Tb	ND	0.004	ND	ND	0.003	ND
Dy	0.003	ND	0.005	0.011	0.011	0.008
Ho	ND	0.004	ND	ND	ND	ND
Er	0.006	0.005	ND	0.002	0.003	0.004
Tm	0.001	ND	ND	0.001	ND	0.001
Yb	0.005	0.003	0.001	0.003	0.008	0.003
Lu	0.003	ND	0.001	ND	0.001	0.001
Hf	ND	ND	0.002	0.004	0.002	ND
Ta	ND	ND	ND	0.001	0.003	ND
Pb	15.723	5.616	3.660	4.283	2.331	10.190
Th	0.001	ND	ND	0.004	ND	ND
U	0.014	0.009	0.006	0.002	0.010	0.045

DOI: 10.22067/ECONG.2021.68737.1008



شکل ۷. بررسی و مقایسه ترکیب شیمیایی کانی‌های کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز موجود در مزوگابروها و آنورتوزیت‌های منطقه کالکافی بر روی نمودارهای بهنجارسازی. A، C و E: نسبت به ترکیب کندریت از سان و مک‌دوناف (Sun and McDonough, 1989)؛ B، D و F: نسبت به ترکیب گوشته اولیه اقتباس از مک‌دوناف و سان (McDonough and Sun, 1995)

Fig. 7. Chemical composition of the clinopyroxenes and plagioclases from the Kal-e-Kafi mesogabbros and anorthosites compared on the normalization graphs; A, C and E: Compared to the chondrite chemical composition after (Sun and McDonough, 1989); B, D and F: Compared to the chemical composition of the primitive mantle from (McDonough and Sun, 1995)

بحث

بررسـی محتوای عناصـر نادر خاکی و کمیاب در پلاژیوکلازهای موجود در گابروها و آنورتوزیت‌های کالکافی بیانگر آن است که این کانی در این دو واحد سـنگی دارای ترکیب یکسـانی از نظر عناصـر اصـلی، نادر خاکی و کمیاب هسـتند (جدول ۳). به همین جهت الگوی عناصـر در آنها در نمودارهای بهنجارشـده نسبت به کندریت و گوشـته اولیه روند یکسـانی داشـته و با یکدیگر هم‌پوشانی دارد (شکل ۷–C و D). این ویژگی بیانگر آن است که پلاژیوکلازهای موجود در گابروها و آنورتوزیت‌های کالکافی دارای منشأ یکسـانی هستند. الگوی کلی عناصـر نادر خاکی در پلاژیوکلازهای مورد بررسـی، بهنجارشـده به ترکیب کندریت روند کاهشـی نشـان می‌دهد و تهی‌شـدگی از HREEs نسـبت به ترکیب کندریت را دارند. در الگوی کلی این عناصـر، آنومالی مثبت Eu وجود دارد؛ به این دلیل که Eu تمایل بیشـتری به ورود در ساختار پلاژیوکلاز دارد، تا اینکه بخواهد وارد کلینوپیروکسن شود (شکل ۷–C). بررسی الگوی عناصر در نمودار چندعنصری بهنجارشده نسبت به ترکیب گوشته اولیه برای پلاژیوکلازها حاکی از تهی‌شـدگی این کانی‌ها از نظر محتوای HFSEs است (شکل ۷–D). پلاژیوکلازها دارای آنومالی منفی Ce و Pr و آنومالی مثبت Pb، Sr و Eu هسـتند. پس به نظر می‌رسـد که عناصـر Rb، Pb، Sr و Ba دارای ضـریب توزیع بالاتری در کانی پلاژیوکلاز اسـت. در حالی که سـایر این عناصـر، ضـریب توزیع بالاتری در کلینوپیروکسن نسبت به پلاژیوکلاز دارند.

مقایسـه محتوای عناصـر در کلینوپیروکسـن‌ها و پلاژیوکلازهای موجود در گابروهای کالکافی که نسبت به کندریت و گوشته اولیه بهنجار شـده‌اند، نشـان می‌دهند که کانی کلینوپیروکسـن نسـبت به پلاژیوکلاز از نظر محتوای اغلب عناصـر نادر خاکی و عناصـر کمیاب غنی‌تر بوده و محتوای MREEs و HREEs در مـذاب توسط تبلور کانی کلینوپیروکسن کنترل‌شده است (شکل ۷–E و F). بنـابراین می‌توان گفت کـه در گـابروهـا، کلینوپیروکسـن‌هـا حمل‌کننده اصلی این عناصر هستند.

پیروکسن از جمله کانی‌های شاخصی است که بررسی ترکیب شـیمیایی این کانی اطلاعات با ارزشـی در مورد شـرایط ماگما، محتوای آب ماگما، فوگاسیته اکسیژن، سری ماگمایی، موقعیت زمین‌ساختی، دما و فشار و ترکیب مذاب در تعادل با آن در اختیار پژوهشگران می‌گذارد (Le Bas, 1962; Schweitzer et al., 1979; Leterrier et al., 1982; D'Antonio and Kristensen, 2005). بررسی شیمی کلینوپیروکسن‌های موجود در مزوگابروهای کالکافی نشـان‌دهنده محتوای Al_2O_3 برابر با ۰/۴۱ تا ۱/۵۲ درصد وزنی و محتوای TiO_2<۰/۱۱ درصد وزنی اسـت (جدول ۲). چگونگی تغییرات این اکسـیدها در کلینوپیروکسـن‌ها بیانگر آن اسـت که مقادیر Al_2O_3 و TiO_2، دارای همبستگی مثبت در این کانی‌ها هستند. مقدار فشار به طور قابل‌توجه بر محتوای Al_2O_3 و TiO_2 در کانی‌های مافیک از جمله کلینوپیروکسـن‌ها تأثیر می‌گذارد و افزایش Al و Ti در این کانی‌ها می‌تواند به وسیله کاهش فشار توجیه‌شود (Delor and Rock, 1991). همبستگی و تطابق مثبت مقادیر TiO_2 و Al_2O_3 در کلینوپیروکسن‌های موجود در گابروهای مورد بررسی اشاره به کاهش فشـار در حین تبلور این کانی‌ها داشـته و تأییدکننده تبلور آنها در حین صعود است.

تعیین شـرایط دما و فشـار تشـکیل کلینوپیروکسـن در گابروهای منطقه کالکافی با اسـتفاده از روش‌های مختلف، محدوده دمایی ۱۰۹۰ تا ۱۱۷۰ درجه سانتی‌گراد و فشار کمتر از ۳ کیلوبار را برای تبلور این کانی‌ها نشان می‌دهد. علاوه بر آن، دماسنجی با استفاده از ترکیب دو فلدسـپار کنار هم، نیز برای فشـارهای یک کیلوبار (Koroll et al., 1993; Anderson, 1996) تـا ۸ کیـلـوبـار (Fuhrman and Lindsley, 1988) نشـان‌دهنده دمای حدود ۸۵۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد برای فلدسپارهای موجود در گابروها و آنورتوزیت‌های کالکافی است.

بررسـی میزان آب مـاگمـا بر مبنـای چگونگی توزیع Al در موقعیت‌های اکتاهدرال و تتراهدرال در کانی کلینوپیروکسن است (Helz, 1973)؛ به گونه‌ای که هر چه مقدار Al^{IV} در شبکه کانی کلینوپیروکسـن افزایش‌یابد، مقدار آب در محیط تبلور آن کاهش

DOI: 10.22067/ECONG.2021.68737.1008

پیدا می‌کند. استفاده از نمودار Al^{IV} در برابر Al^{VI} کلینوپیروکسن‌های موجود در این گابروها میزان آب بیشتر از ده درصد را برای ماگما نشان می‌دهند (شکل ۸-A).

پژوهشگران بسیاری معتقدند (Le Bas, 1962; Helz, 1973; Schweitzer et al., 1979; Leterrier et al., 1982; D'Antonio and Kristensen, 2005) که فوگاسیته اکسیژن عاملی مؤثر در کنترل فرایندهای ماگمایی، توالی تبلور و نوع کانی‌های تبلور یافته است؛ زیرا که فوگاسیته اکسیژن در تغییر دمای لیکوئیدوس و ترکیب مذاب و بلور تأثیر زیادی دارد. ترسیم کلینوپیروکسن‌ها در نمودار Al^{VI}+2Ti+Cr در برابر Al^{IV}+Na نشان‌دهنده قرارگیری این کانی‌ها در محدوده فوگاسیته بالای اکسیژن و تبلور آنها در شرایط اکسیدان است (شکل ۸-B).

بررسی ترکیب شیمیایی ماگما بر مبنای ترکیب کلینوپیروکسن‌های موجود در گابروهای منطقه کالکافی در نمودارهای تعیین سری ماگمایی بیانگر آن است که ترکیب ماگمای سازنده سنگ‌های مورد بررسی ساب‌آلکالن بوده و دارای ماهیت کالک‌آلکالن است (شکل ۸-C). استفاده از ترکیب این کانی‌ها در تمایز موقعیت زمین‌ساختی، بیانگر قرارگیری این نمونه‌ها در موقعیت کوه‌زایی و در محدوده کمان آتشفشانی است (شکل ۸-D).

بررسی الگوی تحولات ماگمایی در منطقه کالکافی

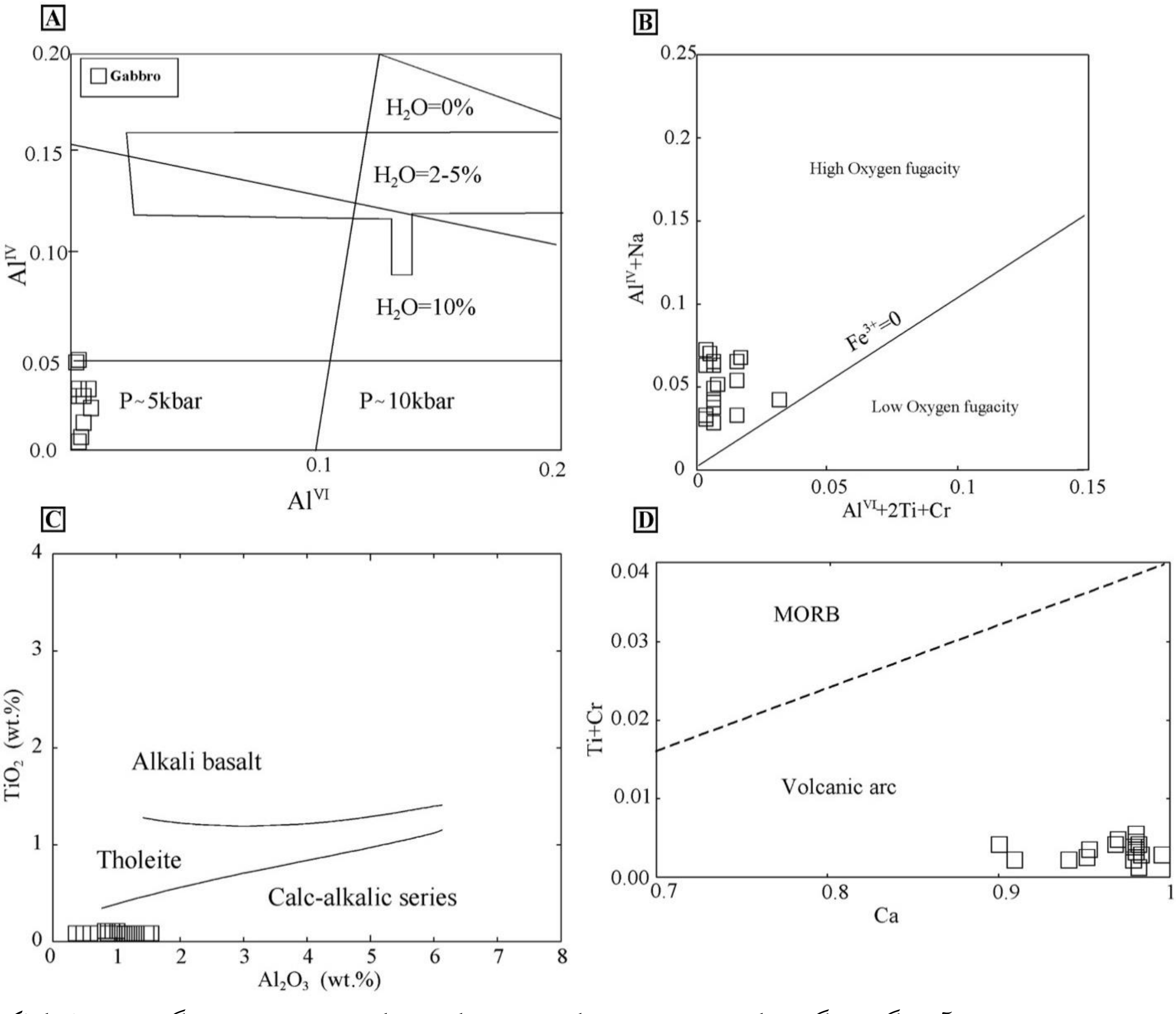
بررسی‌های زمین‌شناسی نشان‌داده است که فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس به زیر خرد قاره شرق- ایران مرکزی، از تریاس تا ائوسن انجام‌شده است (Torabi et al., 2014; Torabi et al., 2019; Shirdashtzadeh et al., 2020; Jamshidzaei et al., 2021). مهم‌ترین شواهد رخداد این فرورانش، وجود مجموعه‌های افیولیتی عشین و نائین و همچنین ماگماتیسم گسترده مرتبط با فرورانش ائوسن در این بخش از سرزمین ایران است. ورود ورقه اقیانوسی به درون گوشته باعث آزاد شدن سیالات شده که رخداد ذوب‌بخشی در پریدوتیت‌های گوه گوشته‌ای را باعث‌شده است. در اثر ذوب‌بخشی پریدوتیت‌های گوشته لیتوسفری و ذوب کلینوپیروکسن‌ها، مذاب بازیک برگرفته از گوه گوشته‌ای به سمت بالا حرکت کرده و در زیر پوسته قاره‌ای و درون آن مستقر می‌شود. مکان جای‌گیری ماگمای برگرفته از گوشته در زیر یا درون پوسته قاره‌ای، جایی است که چگالی ماگمای گوشته‌ای با سنگ‌های آذرین اطراف مساوی یا نزدیک به یکدیگر باشند. استقرار مذاب بازیک در پوسته قاره‌ای زیرین و میانی می‌تواند باعث ذوب سنگ‌های آذرین پوسته قاره‌ای زیرین (آمفیبولیت‌ها) شده و ماگمایی گرانیتی از نوع I را به وجود آورد. آثار وجود و تأثیر ماگمای بازیک برگرفته از گوشته را می‌توان به صورت گابروهایی با طیف ترکیبی گسترده در منطقه کالکافی مشاهده کرد. در پتروژنز گابروها فرایند هضم وتبلور تفریقی[۱] مؤثر است. در ایجاد ماگمای گرانیتی، دو عضو پایانی، یعنی ماگمای برگرفته از گوشته و همچنین سنگ‌های بازیک پوسته زیرین (آمفیبولیت‌ها) دخالت دارند. ماگمای حاصل از ذوب آمفیبولیت‌ها دارای ترکیب گرانیتوئیدی است.

ماگمای بازیک موجود در منطقه کالکافی، بعد از توقف شروع به تبلور و تفریق می‌کند که در اثر تفریق، انواع گابروها از ملاگابرو تا لوکوگابروها ایجادشده است. برای ایجاد گابروها، ابتدا کلینوپیروکسن شروع به تبلور کرده و سپس در حالی‌که کلینوپیروکسن هنوز در حال تبلور بوده است، پلاژیوکلاز نیز به طور همزمان متبلور می‌شود. تبلور همزمان کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز ادامه یافته وپس از مدتی، تبلور کلینوپیروکسن تمام شده و پلاژیوکلاز به تبلور خود ادامه می‌دهد. در بخش‌های شمالی منطقه کالکافی، درست در زمانی که گابروها تشکیل شده‌اند، در اثر رخداد حادثه‌ای زمین‌ساختی، درز و شکاف‌های فراوانی در گابروها ایجاد شده که باعث شده مذاب باقی‌مانده که غنی از مؤلفه پلاژیوکلاز است، به درون این درز و شکاف‌ها رفته و آنورتوزیت‌ها را متبلور کنند (پالایش فشاری[۲]).

بررسی شیمی پلاژیوکلازهای موجود در گابروها و آنورتوزیت‌ها از نظر عناصر اصلی، فرعی و کمیاب و همچنین بررسی‌های صحرایی و پتروگرافی نشان از شباهت بسیار زیاد پتروگرافی و ترکیب شیمیایی پلاژیوکلازهای درون گابروها با پلاژیوکلازهای آنورتوزیت‌ها دارد.

DOI: 10.22067/ECONG.2021.68737.1008

این مســئله احتمالاً نشــان می‌دهد که هنگام تبلور ماگمای بازیک برای ایجاد گابروها، ابتدا کلینوپیروکســن و ســپس بخشــی از پلاژیوکلازها متبلور شــده و در حالی که مذاب باقی‌مانده غنی از مؤلفه پلاژیوکلاز بوده اســت، یک حادثه زمین‌ساختی اتفاق‌افتاده که باعث شــکســتـه‌شــدن گابروها، تبلور پلاژیوکلازها درون شـکسـتگی‌ها و در نتیجه تشـکیل آنورتوزیت‌ها در گابروها شـده اسـت. آنورتوزیت‌های منطقه کالکافی در حقیقت محصـول تبلور بخش روشن و غنی از پلاژیوکلاز ماگمای گابرویی هستند.



شکل ۸. تعیین مقدار محتوای آب ماگما و فوگاسیته اکسیژن با استفاده از ترکیب شیمیایی کلینوپیروکسن‌های موجود در مزوگابروهای منطقه کالکافی. A: نمودار محتوای Al^{VI} در برابر Al^{IV} اقتباس از هلز (Helz, 1973)، B: نمودار Al^{VI}+2Ti+Cr در برابر Al^{IV}+Na اقتباس از شــویتزر و همکاران (Schweitzer et al., 1979)، C: نمودار TiO_2 در برابر Al_2O_3 اقتباس از لوباس (Le Bas, 1962) و D: نمودار (Ti_Cr) در برابر Ca برای تفکیک محیط‌های زمین‌ساختی اقتباس از لوتریر و همکاران، دی آنتونیو و کریستنسن (Leterrier et al., 1982; D'Antonio and Kristensen, 2005)

Fig. 8. Determination of the H2O content and fugacity of Oxygen in the magma by using the chemistry of clinopyroxenes from the Kal-e-Kafi mesogabbros; A: Al^{VI} versus Al^{IV} plot (Helz, 1973), B: Al^{VI}+2Ti+Cr against Al^{IV}+Na diagram (Schweitzer et al., 1979), C: TiO_2 versus Al_2O_3 graph (Le Bas, 1962), and D: the Ca- (Ti_Cr) diagram for discrimination of the tectonic setting (Leterrier et al., 1982; D'Antonio and Kristensen, 2005)

DOI: 10.22067/ECONG.2021.68737.1008

نتیجه‌گیری

توده نفوذی منطقه کالکافی متعلق به ائوسن بالایی است که سنگ‌های آتشفشانی ائوسن میانی، سنگ آهک‌های کرتاسه و دگرگونه‌های انارک با سن پالئوزوئیک را قطع‌کرده است. این توده نفوذی دارای ترکیب عمومی گرانیتوئیدی بوده؛ اما در بخش‌هایی از آن، سنگ‌های گابرویی و آنورتوزیتی قابل مشاهده هستند. آنورتوزیت‌ها به صورت پرکننده شکستگی‌ها در گابروها دیده می‌شوند.

کانی پلاژیوکلاز به عنوان یک کانی اصلی در گابروها و آنورتوزیت‌های منطقه کالکافی وجود دارد. این کانی در گابروها از نوع آنورتیت (بعضی از پلاژیوکلازها به بیتونیت، آندزین و الیگوکلاز دگرسان شده‌اند) است. در آنورتوزیت‌ها نیز پلاژیوکلازها از نوع آنورتیت بوده؛ اما برخی از پلاژیوکلازها به لابرادوریت و بیتونیت دگرسان شده‌اند. کلینوپیروکسن از کانی‌های شاخص موجود در گابروهاست. این کانی در گابروها ترکیب دیوپسید دارد.

بررسی شیمی کانی پلاژیوکلازها در گابروها و آنورتوزیت‌های منطقه نشان‌دهنده شباهت بسیار زیاد ترکیب شیمیایی پلاژیوکلازهای درون گابروها با پلاژیوکلازهای آنورتوزیت‌ها از نظر محتوای عناصر اصلی، فرعی و کمیاب دارد.

بررسی شیمی کانی کلینوپیروکسن‌های موجود در گابروهای کالکافی نشان‌دهنده کاهش آرام فشار در حین تبلور این کانی‌ها بوده و احتمالاً نشان‌دهنده تبلور آنها در حین صعود ماگماست. این ماگما در شرایط محیطی با فوگاسیته بالای اکسیژن متبلور شده است. استفاده از ترکیب شیمیایی کلینوپیروکسن‌های گابروها نشان می‌دهد که ماگمای متبلورکننده آنها دارای ماهیتی شبیه ماگماهای کالک‌آلکالن موجود در کمان‌های آتشفشانی بوده است.

قدردانی

از دانشگاه اصفهان به دلیل حمایت مالی از این پژوهش تشکر می‌شود.

1. Assimilation and Fractional Crystallization = ACF
2. Filter pressing

DOI: 10.22067/ECONG.2021.68737.1008

References

Ahmadian, J., 2012. Geochemistry, Mineral Chemistry and Petrology of Kal-e Kafi Ore-bearing intrusive bodies, E Anarak pages. Ph.D. Thesis, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran, 264 pp. (in Persian with English abstract)

Ahmadian, J., Haschke, M., McDonald, I., Regelous, M., Ghorbani, M.R., Hashem Emami, M. and Murata, M., 2009. High magmatic flux during Alpine-Himalayan collision: Constraints from the Kal-e-Kafi complex, central Iran. Geological Society of America Bulletin, 121(5–6): 857–868. https://doi.org/10.1130/B26279.1

Ahmadian, J., Sarjoughian, F., Lentz, D., Esna-Ashari, A., Murata, M. and Ozawa, H., 2016. Eocene K-rich adakitic rocks in the Central Iran: implications for evaluating its Cu–Au–Mo metallogenic potential. Ore Geology Reviews, 72: 323–342. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.07.017

Aistov, L., Melnikov, B., Krivyakin, B. and Morozov, L., 1984. Geology of the Khur Area (Central Iran), Explanatory text of the Khur quadrangle map 1:250,000. Geological Survey of Iran,Tehran, 132 pp.

Anderson, J.L., 1996. Status of thermo-barometry in granitic batholiths. Earth Science Reviews, 87(1–2): 125–138. https://doi.org/10.1017/S0263593300006544

Aoki, K. and Shiba, I., 1973. Pyroxene from lherzolite inclusions of Itinomegata. Japan. Lithos, 6(1): 41–51. https://doi.org/10.1016/0024-4937(73)90078-9

Ashchepkov, I.V. and André, L., 2002. Pyroxenite xenoliths in picrite basalts (Vitim Plateau): origin and differentiation of mantle melts. Russian Geology and Geophysics, 43(4): 343–363. Retrieved May 09, 2021 from https://repository.geologyscience.ru/bitstream/handle/123456789/29776/Ashc_02.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Charlier, B., Namur, O., Bolle, O., Latypov, R. and Duchesne, J.C., 2015. Fe-Ti-V-P ore deposits associated with Proterozoic massif-type anorthosites and related rocks. Earth Science Reviews, 141(1): 56–81. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.005

D'Antonio, M. and Kristensen, M.B., 2005. Data report: electron microprobe investigation of primary minerals in basalts from the west Philippine Sea Basin (ocean drilling program log 195, site 1201). Ocean Drilling Program, 195(1): 1–24. https://doi.org/10.2973/odp.proc.sr.195.108.2005

Deer, W.A., Howie, R.A. and Zussman, J., 1992. An introduction to the rock forming minerals. Longman, London, 528 pp. https://doi.org/10.1080/00357529.2014.926186

Delor, C.P. and Rock, N.M.S., 1991. Alkaline-ultramafic lamprophyre dykes from the Vestfold Hills, Princess Elizabeth Land (East Antarctica): Primitive magmas of deep mantle origin. Antarctic Science, 3(4): 419–432. https://doi.org/10.1017/S0954102091000512

Fuhrman, M.L. and Lindsley, D.H., 1988. Ternary-feldspar modeling and thermometry. American Mineralogist, 73(3–4): 201–215. Retrieved May 09, 2021 from https://pubs.geoscienceworld.org/msa/ammin/article-abstract/73/3-4/201/42101/Ternary-feldspar-modeling-and-thermometry?redirectedFrom=fulltext

Green, D.H., Falloon, T.J., Eggins, S.M. and Yaxley, G.M., 2001. Primary magmas and mantle temperatures. European Journal of Mineralogy, 13 (3): 437–452. https://doi.org/10.1127/0935-1221/2001/0013-0437

Helz, R.T., 1973. Phase relations of basalts in their melting range at P (sub H_2O) = 5kb as a function of oxygen fugacity: part I. mafic phases. Journal of Petrology, 14(2): 249–302. https://doi.org/10.1093/petrology/17.2.139

Jamshidzaei, A., Torabi, G., Morishita, T. and Tamura, A., 2021. Eocene dike swarm and felsic stock in Central Iran: roles of metasomatized mantle wedge and Neo-Tethyan slab. Journal of Geodynamics, 145(1): 101844 https://doi.org/10.1016/j.jog.2021.101844

Koroll, H., Evangelakakkis, C. and Voll, G. 1993. Two feldspar geothermometry: A review and revision for slowly cooled rocks. Contributions to Mineralogy and Petrology, 114(1): 510–518. https://doi.org/10.1007/BF00321755

Le Bas, M.J., 1962. The role of aluminum in igneous clinopyroxenes with relation to their parentage. American Journal of Science, 260(4): 267–288. https://doi.org/10.2475/ajs.260.4.267

Leterrier, J., Maury, R.C., Thonon, P., Girard, D. and Marchal, M., 1982. Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series. Earth and

Planetary Science Letters, 59(1): 139–154. https://doi.org/10.1016/0012-821X(82)90122-4

McDonough, W.F. and Sun, S.S., 1995. The composition of the earth. Chemical Geology, 120(3–4): 223–253. https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4

Namdar Mohammadi, T., 2009. Study of copper-molybdenum mineralization and related alterations in the Kal-e-Kafi intrusive body - northeast of Anarak. MSc thesis in Geology, Petrology, University of Payame Noor, Isfahan, Iran, 162 pp. (in Persian with English abstract)

Nazari, G.H., Torabi, G., Arai, S. and Morishita, T., 2019. Lower Oligocene Calc-Alkaline Spessartitic Lamprophyres from Central Iran (East of Anarak Area); an Evidence from the Eastern Branch of Neotethys Subduction-Related Mantle Enrichment. Geotectonics, 53(6): 786–805. https://doi.org/10.1134/S0016852119060098

Ranjbar, S., 2010. Petrological and mineralogical research on the skarns in the Kal-e-Kafi area (NE of Anarak, Isfahan province), M.Sc. Thesis in Petrology, University of Isfahan, Isfahan, Iran, 135 pp. (in Persian with English abstract)

Romanko, E., Kokorin, Yu., Krivyakin, B., Susov, M., Morozov, L. and Sharkovski, M., 1984. Outline of metallogeny of Anarak area (Central Iran): explanatory text to metallogenic map, 1:250000. Moscow, Geological Survey of Iran, Tehran, Technoexport Report 19, 136 pp.

Salim, H., 2019. Mineralogical characteristics of plagioclase and clinopyroxene in the gabbros and anorthosites from the Kal-e-kafi intrusion (Northeast of Anarak, Isfahan pro Salim ince, Central Iran). M.Sc. Thesis, University of Isfahan, Isfahan, Iran (in Persian with English abstract), 150 pp.

Sargazi, M. and Torabi, G., 2019. Petrography and mineral chemistry of the Eocene granodiorites in the Toveireh area (Southwest of Jandaq, Isfahan province). Journal of Economic Geology, 10(2): 449–470. (in Persian with English abstract) https://dx.doi.org/10.22067/econg.v10i2.60825

Schweitzer, E.L., Papike, J.J. and Bence, A.E., 1979. Statistical analysis of clinopyroxene from deep-sea basalts. American Mineralogist, 64(5–6): 501–513. Retrieved May 09, 2021 from https://pubs.geoscienceworld.org/msa/ammin/article-abstract/64/5-6/501/41015/Statistical-analysis-of-clinopyroxenes-from-deep?redirectedFrom=PDF

Shirdashtzadeh, N., Torabi, G. and Morishita, T., 2020. Evolution of lithospheric mantle in the north of Nain-Baft oceanic crust (Neo-Tethyan ophiolite of Ashin, Central Iran). Island Arc, 29(1): e12342. https://doi.org/10.1111/iar.12342

Sun, S.S., and McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. The Geological Society Spetial Publication, London, 42(1): 313–346. https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19

Torabi, G., Arai, S. and Abbasi, H., 2014. Eocene continental dyke swarm from Central Iran (Khur area). Petrology, 22(6): 617–632. https://doi.org/10.1134/S086959111406006X

Torabi, G., Morishita, T. and Arai, Sh., 2019. Two types of plagiogranite from Mesozoic Ashin Ophiolite (Central Iran): a mark of tectonic setting change from Jurassic to Cretaceous. Geotectonics, 53(1): 110–124. http://doi.org/10.1134/S0016852119010084

Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. American Mineralogist, 95(1): 185–187. https://doi.org/10.2138/am.2010.3371

Woodruff, L.G., Nicholson, S.W. and Fey, D.L., 2013. A deposit model for magmatic iron-titanium-oxide deposits related to Proterozoic massif anorthosite plutonic suites: U.S. Geological Survey, Reston, 47 pp. https://doi.org/10.3133/sir20135091

Yakovenko, V., Chinakov, I., Kokorin, Yu. and Krivyakin, B., 1981. Report on geological prospecting in Anarak area (Kal-e Kafi- Khuni locality), V/O Technoexport, Moscow, Report 13, .293 pp.

Zakipour, Z. and Torabi, G., 2021. Metamorphism of peridotites from Kal-e-Kafi area (Isfahan Province, Central Iran). Advanced Applied Geology, 11(1): 136–156. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22055/aag.2020.29597.1989